

SIFAT FIZIK DAN MEKANIK IKATAN WAYAR
EMAS UNTUK PRESTASI PENYAMBUNGAN
DAI BERTINDAN

AHMAD ZARIF BIN AZAHAR

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

**SIFAT FIZIK DAN MEKANIK IKATAN WAYAR EMAS UNTUK PRESTASI
PENYAMBUNGAN DAI BERTINDAN**

AHMAD ZARIF BIN AZAHAR

**TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH
IJAZAH SARJANA**

**INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO DAN NANOELEKTRONIK
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI**

2026

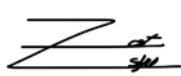
	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/ DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN

Bil. No	Perkara / Items	Senarai Semak (√) Check List
1.	Mematuhi Panduan Menulis Tesis Gaya UKM (Sila layari https://www.ukm.my/akademik/pelajar-pascasiswazah/) <i>Comply with the UKM Style Guide.</i> (Please visit https://www.ukm.my/akademik/pelajar-pascasiswazah/)	✓
2.	Borang Perakuan Tesis / Disertasi Sarjana / Doktor Falsafah dimasukkan bersama tesis akhir dalam bentuk salinan lembut <i>Insert the Certification of Master's/ Doctoral Thesis/ Dissertation with the final thesis/dissertation in soft copy form.</i>	✓
3.	Menyerahkan salinan tesis / disertasi versi akhir (salinan lembut) kepada Fakulti / Institut dan Perpustakaan mengikut keperluan masing-masing <i>Submit the final version of the thesis/ dissertation (soft copy) to the Faculty/Institute and Library according to their respective requirements.</i>	✓
4.	Menyerahkan salinan tesis / disertasi versi akhir kepada semua penyelia <i>Submit a copy of the final version of the thesis/ dissertation to all supervisors.</i>	✓
5.	Menyerahkan salinan syarat penerbitan <i>Submit the proof of publication requirements.</i>	✓

	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

**BORANG PENYERAHAN TESIS/DISERTASI YANG TELAH DIBUAT PEMBETULAN
AMENDED THESIS/ DISSERTATION SUBMISSION**

A. MAKLUMAT PELAJAR (STUDENT DETAILS)			
Nama Name	AHMAD ZARIF BIN AZAHAR		
No. Pendaftaran Registration No.	P112419		
Jabatan Department			
Fakulti / Institut Faculty / Institute	INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO & NANOELEKTRONIK		
Program Pengajian Program of Study	Sarjana (Master) ☒	Doktor Falsafah (Doctor of Philosophy) ☐	
Alamat: Address	NO.5 JALAN MANDARINA 3, TAMAN BUKIT MANDARINA, 56000, CHERAS, KUALA LUMPUR		
E-mel/ Email: azarif.azahar@gmail.com		No. Telefon/ Tel. No: 011-10499596	
B. MAKLUMAT TESIS / DISERTASI (THESIS / DISSERTATION DETAILS)			
Tajuk Tesis/ Disertasi (Thesis / Dissertation Title): SIFAT FIZIK DAN MEKANIK IKATAN WAYAR EMAS UNTUK PRESTASI PENYAMBUNGAN DAI BERTINDAN			
Tandatangan: Signature 		Tarikh: Date 5 FEBRUARI 2026	
C. PERAKUAN PENYELIA DAN PEMERIKSA DALAM ** (APPROVAL FROM SUPERVISORS AND INTERNAL EXAMINER) **			
Nama: DR. MARIA BINTI ABU BAKAR Name (Penyelia Utama/Pengerusi Jawatankuasa Penyeliaan)		Tandatangan: Signature 	

	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

(Main Supervisor/ Chairperson of The Supervisory Committee)	
Nama/Name: PROF. DR. AZMAN JALAR (Penyelia Bersama / Ahli Jawatankuasa Penyeliaan) (Co-Supervisor/ Member of Supervisory Committee)	Tandatangan:  Signature
Nama/Name: (Ahli Jawatankuasa Penyeliaan / Member of Supervisory Committee)	Tandatangan: Signature
Nama/Name: DR. RAIHANA BINTI BAHRU (Pemeriksa Dalam / Internal Examiner)	Tandatangan:  Signature

**Potong yang tidak berkenaan / Delete where not appropriate

D. PENGESAHAN FORMAT TESIS/DISERTASI / CONFIRMATION OF THESIS/DISSERTATION FORMAT COMPLIANCE

Disahkan bahawa format tesis/disertasi adalah mengikut Gaya UKM dan calon dibenarkan menyerahkan tesis/disertasi dalam bentuk salinan lembut.

This is to confirm that the thesis/dissertation format complies with the UKM Style Guide and is approved for submission in soft copy form.

Tandatangan:



Tarikh: 5 FEBRUARI 2026

Date

(Penyelia Utama / Pengerusi Jawatankuasa Penyeliaan)
(Main Supervisor/ Chairperson of The Supervisory Committee)

E. PERAKUAN KETUA JABATAN / KETUA PROGRAM / PENERUSI PUSAT PENGAJIAN APPROVAL FROM HEAD OF DEPARTMENT / HEAD OF PROGRAM / SCHOOL CHAIRPERSON

Tandatangan:

Signature



Nama dan Cap Rasmi:
Name and Official Stamp

PROE. MADYA DR. MUHAMAD RAMDZAN BIN BUYONG
 Timbalan Pengarah
 Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN)
 Universiti Kebangsaan Malaysia
 43600 UKM Bangi

Tarikh:

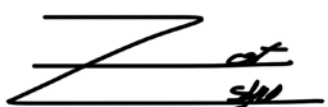
Date 26 Februari 2026

	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

F. KELULUSAN DEKAN/PENGARAH / APPROVAL FROM DEAN/DIRECTOR			
Tandatangan: Signature		Tarikh: Date	
 PROF. IR. DR. AHMAD ASHRIF A. BAKAR Pengarah		26 Februari 2026	
Nama dan Cap Rasmi: Name and Official Stamp		Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN) Universiti Kebangsaan Malaysia 43600 UKM Bangi	
G. PERAKUAN TESIS/ DISERTASI SARJANA / DOKTOR FALSAFAH (CERTIFICATION OF MASTER'S / DOCTORAL THESIS / DISSERTATION)			
Nama penuh pengarang (Author's Full Name)		AHMAD ZARIF BIN AZAHAR	
No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.)		P112419	Sesi Akademik (Academic Session) 2/20252026
Tajuk Tesis / Disertasi (Thesis / Dissertation Title)		SIFAT FIZIK DAN MEKANIK IKATAN WAYAR EMAS UNTUK PRESTASI PENYAMBUNGAN DAI BERTINDAN	
Semua tesis/disertasi dan penerbitan berkaitan hasil penyelidikan pelajar adalah tertakluk kepada Dasar Harta Intelek Universiti Kebangsaan Malaysia. <i>All theses/ dissertations and publications relating to the research work of a student are subject to the Intellectual Property Policy of Universiti Kebangsaan Malaysia.</i> Saya mengaku bahawa tahap akses tesis/disertasi ini sebagai (*Tandakan ✓ dalam kotak bagi maklumat yang berkaitan; tandakan satu (1) kotak di bawah sahaja): <i>I hereby declare the level of access for this thesis/dissertation as follows (tick ✓ the relevant box below; tick only one option).</i>			
Pilihan Tahap Akses Access Level Selection		Tafsiran Tahap Akses Tesis/Disertasi Definition of Thesis/Dissertation Access Level	
☐	RAHSIA (CONFIDENTIAL)	Mengandungi maklumat rahsia sepertimana yang diperuntukan bawah Akta Rahsia Rasmi 1972. <i>Contains classified information as stipulated under the Official Secrets Act 1972.</i>	
☒	TERHAD (RESTRICTED)	Mengandungi maklumat yang hanya boleh diakses oleh pihak yang mempunyai kebenaran atau keperluan tertentu untuk mengetahuinya yang ditentukan oleh organisasi/ badan di mana penyelidikan dijalankan. <i>Contains information that may only be accessed by parties with specific authorization</i>	

	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

		<i>or a defined need to know, as determined by the organization or body where the research is conducted.</i>
☐	AKSES TERBUKA (OPEN ACCESS)	Tesis/disertasi versi akhir dalam format PDF yang boleh diakses secara percuma secara dalam talian dan bebas dari isu hak cipta dan pelesenan <i>The final version of the thesis/dissertation in PDF format that is freely accessible online and free from copyright and licensing issues.</i> Kementerian Pendidikan Tinggi melalui surat bertarikh 27 Mac 2025 memutuskan bahawa kebenaran akses tesis / disertasi dalam borang serahan akses terbuka ditentukan oleh penyelia (bukan pelajar). <i>The Ministry of Higher Education, through a letter dated 27 March 2025, has decided that permission for thesis / dissertation access in the open access submission form shall be determined by the supervisor (not the student).</i>
☐	EMBARGO	Tempoh masa di mana akses kepada tesis/disertasi disekat (ditutup) selama dua (2) tahun atas sebab-sebab tertentu sebagai contoh kerahsiaan atau hak cipta. Tesis/disertasi akan berstatus akses terbuka selepas tamat tempoh <i>embargo</i>. <i>The period during which access to the thesis/dissertation is restricted for two (2) years due to specific reasons, such as confidentiality or copyright. The thesis/dissertation will be granted open-access status upon the expiry of the embargo period.</i>

PENGESAHAN PELAJAR (STUDENT VERIFICATION)	PENGESAHAN PENYELIA (SUPERVISOR VERIFICATION)
 TANDATANGAN PELAJAR (STUDENT'S SIGNATURE)	 TANDATANGAN PENYELIA / Pengerusi JK SISWAZAH (SUPERVISOR'S / CHAIRPERSON SUPERVISION COMMITTEE SIGNATURE)
Nama Pelajar (Student name): No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.) AHMAD ZARIF BIN AZAHAR P112419 Tarikh: (Date) 5 FEBRUARI 2026	Nama Penyelia / Pengerusi JK Siswazah : (Supervisor's / Chairperson Supervision Committee Name) DR. MARIA BINTI ABU BAKAR Tarikh: (Date) 5 FEBRUARI 2026

PENGAKUAN

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

19 Februari 2026

AHMAD ZARIF BIN AZAHAR
P112419

PENGHARGAAN

Dengan nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang.

Alhamdulillah dengan izin dan rahmat-Nya dapat juga saya menyiapkan kajian ini dalam masa yang ditetapkan dan dalam bentuk sebegini rupa. Di sini, saya ingin mengambil kesempatan mengucapkan setinggi-tinggi penghargaan dan jutaan terima kasih kepada pihak-pihak yang terlibat. Jutaan terima kasih terhadap Dr. Maria Abu Bakar selaku penyelia utama dan Prof. Dr. Azman Jalar selaku penyelia bersama kerana banyak memberi bimbingan dan tunjuk ajar. Juga setinggi penghargaan ditujukan kepada isteri saya Puan Nur Syuhaida binti Abd Manan di atas keprihatinan dan motivasi sepanjang tempoh ini.

Terima kasih juga saya ucapkan kepada pihak Western Digital®, SanDisk Storage Malaysia Sdn. Bhd. dan Universiti Kebangsaan Malaysia di atas bantuan kewangan dan teknikal melalui kolaborasi penyelidikan di bawah geran penyelidikan RR-2020-004 dan RR-2023-007. Terima kasih tidak terhingga buat Jabatan *Package Technology Development* di atas sumbangan bahan penyelidikan dalam kolaborasi projek ini. Tidak lupa juga kepada Dr Fakhrozi Che Ani kerana telah banyak memberikan kata kata semangat kepada saya sepanjang pengajian sarjana ini. Saya juga ingin mengambil kesempatan untuk mengucapkan ribuan terima kasih kepada pengurus saya, Loeh Jiun Dong dan Derek Mong di atas kesefahaman dan fleksibiliti dalam bekerja sepanjang tempoh ijazah sarjana ini.

Saya juga ingin berterima kasih kepada ayah, ibu, isteri, keluarga serta sahabat handai tercinta di atas doa dan dorongan yang telah diberikan bagi mencapai kejayaan ini. Juga ucapan terima kasih kepada semua pihak yang secara langsung atau tidak langsung membantu sepanjang tempoh ini. Jasa kalian amat dihargai.

Sekian, terima kasih.

ABSTRAK

Proses ikatan wayar adalah teknik penyambungan yang digunakan dalam semikonduktor untuk mencipta sambungan elektrik antara komponen-komponen kecil. Dua jenis metodologi ikatan wayar yang dikenali dalam industri semasa adalah ikatan bola dan ikatan baji. Terdapat tiga kaedah berbeza ikatan wayar untuk mencipta sambungan yang kuat antara wayar dan permukaan penyambung yang dikenali sebagai termasonik, termomampatan, dan ultrasonik. Wayar yang sering digunakan sebagai medium penyambung utama adalah emas atau kuprum dalam trend industri semasa. Kajian ini memfokuskan kepada prestasi penyambungan wayar emas (Au) bagi sambungan antara 4 lapisan dai bertindan dan satu lagi dai bertindan dengan struktur dai tergantung. Kajian ini memfokuskan pada wayar perak yang disaluti dengan emas (ACA) untuk menghasilkan ikatan wayar yang lain dan hasil kekuatan pengikatan diselidiki dalam kajian ini. Didapati bahawa parameter yang digunakan semasa pengikatan wayar ACA dengan parameter sedia ada untuk pengikatan wayar Au. Kajian juga mendapati bahawa parameter yang diprogramkan dalam sampel F adalah yang terbaik bagi pengikatan wayar ACA dengan parameter pengikatan yang lebih tinggi. Selain itu, kajian ini bertujuan untuk mengkaji ketulenan emas 2N, 3N dan 4N dengan diameter wayar 0.7 mil terhadap kekuatan ikatan wayar pada pad aluminium dan wayar emas. Didapati bahawa pengikatan wayar menggunakan wayar 4N memberi hasil yang berbeza dengan pengikatan wayar 2N, selari dengan sifat fizikal dan mekanikalnya. Dengan menggunakan parameter pengikatan yang sama, diperoleh bahawa wayar 2N yang telah diikat adalah lebih sukar untuk dibentuk, memberikan ketebalan bola yang lebih tinggi dan saiz bola yang lebih kecil berbanding hasil pengikatan wayar 4N. Pembentukan sebatian antara logam (IMC) bagi wayar Au 4N adalah lebih tinggi berbanding 2N, menunjukkan ketulenan wayar yang lebih tinggi membawa kepada pembentukan sebatian antara logam yang lebih mudah. Dengan perkembangan reka bentuk seni bina semasa yang membolehkan konfigurasi dai bertindan dalam pakej terkini. Konfigurasi bertindan mencipta struktur unik yang mana tiada struktur sokongan di bawah dai ikatan wayar. Ini lebih merumitkan proses ikatan wayar dan kualitinya semasa proses ikatan wayar. Kajian ini merangkumi daya ikatan berbeza 6, 16, dan 26 g dan jarak gantungan berbeza 150, 250 dan 350 μm untuk menilai prestasi kualiti ikatan wayar. Semasa penilaian daya 26 g dengan 350 μm , didapati keretakan dai berlaku semasa ikatan wayar. Kualiti ikatan wayar ditentukan oleh beberapa kaedah ujian saiz bola, ketebalan bola, ujian ricih, ujian tarik wayar dan pemerhatian terhadap liputan IMC. Kekuatan ikatan wayar adalah lebih baik dengan ketulenan Au yang lebih rendah dan wayar ACA mampu mencapai kualiti ikatan wayar Au yang setanding dengan beberapa pengoptimuman parameter. Juga diperhatikan bahawa kualiti ikatan wayar pada reka bentuk seni bina dai tergantung dipengaruhi oleh pesongan yang berlaku semasa ikatan wayar. Semakin tinggi daya (26 g) yang digunakan semasa ikatan wayar pada struktur tergantung (150-350 μm), semakin rendah kualiti ikatan wayar. Begitu juga, semakin panjang jarak dai tergantung (350 μm), semakin rendah kualiti ikatan wayar. Selain itu, didapati bahawa amplitud pesongan yang lebih tinggi pada lokasi ikatan wayar tertentu, semakin rendah kualiti ikatan wayar pada lokasi ikatan wayar tersebut.

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GOLD WIRE BONDING FOR STACKED DIE CONNECTION PERFORMANCE

ABSTRACT

Wire bonding process is an interconnect technique used in semiconductor to create electrical connections between tiny components. Two type of wire bonding methodology known in current industry is ball bonding and wedge bonding. There are three different methods of wire bonding for creating a strong interconnection between the wire and the bonding surface known as thermosonic, thermocompression, and ultrasonic. Wire used as the medium of interconnect mainly is gold or copper in current industry trend. This study focuses on the performance of gold (Au) wire bonding for 4 stacked die interconnection and another one stacked die with overhang structure. This work aimed silver wire was coated with gold (ACA) to establish another medium of wire bonding and the result of bonding strength was studied in this report. It is found that the wire bonding parameter used for ACA wire is not compatible with the current Au wire bonding parameter. The study found that the parameter that was programmed in sample F with higher bonding parameter is the best parameter for ACA wire bonding. In addition, the purity of gold of 2N, 3N and 4N with wire diameter of 0.7mil towards the strength of wire bonding on aluminium bond pad and Au wire were also investigated. It was found that bonding with 4N wire will have different bonding output compared to 2N in which aligning to its physical and mechanical properties. With the same wire bonding parameter, it was observed that 2N bonded wire is harder to deformed, leading to higher ball thickness and smaller ball size compared to 4N bonded wire. IMC formation of 4N Au wire is higher compared to 2N, this shows that the higher wire purity leads to easier intermetallic compound formation. With current development of architecture design enable the stacked die configuration in the recent package. The overhang stacked configuration creates a unique structure where there is no support structure underneath the wire bonding die. This further complicates the wire bonding process and its quality during wire bonding process. The study includes different bonding force of 6, 16, and 26 g and different overhang distance of 150, 250 and 350 μm to evaluate the performance of wire bonding quality. During the evaluation of 26 g force with 350 μm , it is found that die crack happened during the bonding. The quality of wire bonding was determined by ball size, ball thickness, ball shear, wire pull, and observation on the IMC coverage. The bonding strength is better with lower gold purity and silver coated with gold wire able to achieve comparable quality of gold wire bonding with several parameter optimization. It is also observed that the quality of wire bonding on overhang architecture design influenced by the deflection that happened during bonding. The higher the force (26 g) applied during bonding on overhang structure (150-350 μm), the lower the quality of wire bonding. Similarly, the longer the overhang distance (350 μm), the lower the wire bonding quality. In addition, it is found that the higher amplitude of deflection at certain bonding location, the lower the quality of the wire bonding on that specific bonding location.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	ii
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI JADUAL	x
SENARAI ILUSTRASI	xi
SENARAI SINGKATAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Pengenalan	1
1.2 Permasalahan Kajian	4
1.3 Objektif Kajian	8
1.4 Skop Kajian	9
1.5 Organisasi Tesis	10
BAB II KAJIAN KEPUSTAKAAN	
2.1 Pengenalan	11
2.2 Ikatan Wayar dalam Pempakejan Elektronik	11
2.3 Jenis-Jenis Bahan sebagai Ikatan Wayar	15
2.3.1 Wayar emas (Au)	15
2.3.2 Wayar kuprum (Cu)	20
2.3.3 Wayar perak (Ag)	29
2.4 Jenis Pempakejan Elektronik	37
2.4.1 Pempakejan 2D	37
2.4.2 Pempakejan 2.5D	38
2.4.3 Pempakejan 3D	39
2.4.4 Struktur dai tergantung	40

BAB III	KAEDAH KAJIAN	
3.1	Pengenalan	44
3.2	Proses Pembuatan Dai Bertindan	45
3.3	Proses Penyediaan Dai (DP)	47
	3.3.1 Wafer Si	47
	3.3.2 Pengisaran belakang wafer Si	48
	3.3.3 Lekapan filem pelekat dai (DAF)	50
	3.3.4 Pemotongan mekanik	51
3.4	Teknologi Lekapan Permukaan (SMT)	53
	3.4.1 Pencetakan skrin	53
	3.4.2 Pemasangan komponen cip	54
	3.4.3 Proses pematerian aliran semula	55
3.5	Proses Pelekatan Dai (DA)	57
	3.5.1 Proses pilih-dan-angkat	58
	3.5.2 Tindakan dai	61
	3.5.3 Ketuhar tekanan tinggi	62
3.6	Penyediaan Proses Pengikatan Wayar	63
	3.6.1 Penyediaan parameter mesin dan bahan	63
	3.6.2 Proses pengikatan wayar	64
3.7	Kajian Kes Pertama: Kesan Salutan Wayar Yang Berbeza Terhadap Prestasi Ikatan Wayar dalam Pakej Dai Bertindan	65
	3.7.1 Penyediaan struktur sampel dai	65
	3.7.2 Ikatan wayar Ag dengan salutan Au (ACA)	68
	3.7.3 Parameter kajian kes pertama	71
3.8	Kajian Kes Kedua: Kesan Ketulenan Wayar Yang Berbeza Terhadap Prestasi Ikatan Wayar dalam Pakej Dai Bertindan	71
	3.8.1 Penyediaan struktur sampel dai	71
	3.8.2 Ketulenan wayar Au	71
	3.8.3 Parameter kajian kes kedua	75
3.9	Kajian Kes Ketiga: Kesan Struktur Dai Tergantung Terhadap Prestasi Ikatan Wayar dalam Pakej Dai Bertindan	76
	3.9.1 Penyediaan struktur sampel dai	76
	3.9.2 Parameter kajian kes ketiga	79

3.10	Pengujian Dan Pencirian Ikatan Wayar Dalam Pakej Dai Bertindan	79
3.10.1	Penerapan, pencirian mikrostruktur dan analisis liputan Sebatian antara logam (IMC)	79
3.10.2	Pencirian sifat mikromekanik	85
BAB IV	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	
4.1	Pengenalan	87
4.2	Penyediaan Struktur Sampel	87
4.2.1	Pelekatan dai	89
4.3	Kajian Kes Yang Pertama: Kesan Salutan Wayar Yang Berbeza Terhadap Prestasi Ikatan Wayar dalam Pakej Dai Bertindan	90
4.3.1	Struktur sampel	90
4.3.2	Wayar perak bersalut emas (ACA)	90
4.3.3	Hasil pengikatan: pencirian mikrostruktur	92
4.3.4	Hasil pengikatan: pencirian sifat mikromekanik	96
4.4	Kajian Kes Yang Kedua: Kesan Ketulenan Wayar Yang Berbeza Terhadap Prestasi Ikatan Wayar dalam Pakej Dai Bertindan	101
4.4.1	Struktur sampel	101
4.4.2	Wayar Au dengan ketulenan 4N, 3N, dan 2N	102
4.4.3	Hasil pengikatan: pencirian mikrostruktur	103
4.4.4	Hasil pengikatan: pencirian sifat mikromekanik	107
4.5	Kajian Kes Yang Ketiga: Kesan Struktur Dai Tergantung Terhadap Prestasi Ikatan Wayar dalam Pakej Dai Bertindan	111
4.5.1	Struktur sampel	111
4.5.2	Ikatan pada dai tergantung	112
4.5.3	Hasil pengikatan: kajian pesongan	112
4.5.4	Hasil pengikatan: pencirian mikrostruktur	121
BAB V	KESIMPULAN DAN CADANGAN	
5.1	Kesimpulan	128
5.2	Cadangan Kajian	130

RUJUKAN	132
----------------	-----

LAMPIRAN A

A Senarai Penerbitan	142
---------------------------	-----

SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
Jadual 2.1	Keputusan ujian kebolehharian, nisbah yang merosot selepas ujian	28
Jadual 2.2	Formula pesongan rasuk	41
Jadual 3.1	Parameter proses pengisaran belakang	50
Jadual 3.2	Parameter proses pemotongan wafer Si	52
Jadual 3.3	Parameter proses pelekatan dai	61
Jadual 3.4	Parameter proses pengikatan wayar kajian kes pertama	72
Jadual 3.5	Parameter proses pengikatan wayar kajian kes kedua	76
Jadual 3.6	Parameter proses pengikatan wayar kajian kes ketiga	79
Jadual 4.1	Nilai ricih, saiz bola mengikut luas bagi semua sampel yang diukur	109
Jadual 4.2	Nilai purata dan tertinggi pesongan bagi setiap sampel	120
Jadual 4.3	Liputan IMC antara Al dan Au bagi unit yang diikat untuk bola sudut dan bola tengah	124

SENARAI RAJAH

No Rajah		Halaman
Rajah 1.1	Harga Au 10 tahun dalam MYR/g	5
Rajah 1.2	Peratusan penggunaan jenis wayar dalam industry pengikatan wayar	6
Rajah 2.1	Skematik pembentukan ikatan bola dan ikatan baji dalam pampakejan elektronik	14
Rajah 2.2	Gambar keratan rentas antara muka ikatan wayar Au selepas penuaan pada suhu 130°C selama 200 jam	19
Rajah 2.3	Percikan Al pada ikatan bola	21
Rajah 2.4	Sifat mekanik dan elektrik aloi Cu-Ag yang dipadatkan secara berarah	24
Rajah 2.5	Morfologi permukaan wayar Cu bersalut Pd (a) salutan mengelupas (b) salutan menggelembung	25
Rajah 2.6	(a) Imej SEM pembentukan IMC AuAl selepas tekanan kebolehharian menunjukkan lompong Kirkendall (b) Imej SEM menunjukkan pembentukan IMC CuAl nipis pada tahap ikatan pakej wayar Cu sebelum tekanan kebolehharian	27
Rajah 2.7	Imej TEM antara muka Cu-Al selepas penegaran pada 175°C selama 25 jam	27
Rajah 2.8	Beban patah pelbagai wayar aloi Ag	32
Rajah 2.9	Struktur butiran dalam keratan rentas memanjang wayar ikatan asal (a) Ag-8Au-3Pd dengan kembar penegaran (b) wayar t10adisional Ag-8Au-3Pd	33

Rajah 2.10	Panjang zon terjejas haba (HAZ) wayar aloi Ag (a) wayar Ag-1.7Pd (b) wayar Ag-1.7Pd-0.75Zn	34
Rajah 2.11	Morfologi FAB bagi wayar Ag bersalut Au (a) ketebalan salutan Au 48.7 nm (b) 108 nm (c) 174.7 nm	35
Rajah 2.12	Mekanisme pengekangan kakisan (a) wayar Ag tanpa salutan (b) wayar aloi Ag-3Pd	36
Rajah 2.13	Seni bina reka bentuk pempakejan (a) 2D (b) 2.5D (c) 3D	38
Rajah 2.14	Nilai pesongan dai semasa proses pengikatan wayar pada tergantung menggunakan (a) wayar Au (b) wayar Cu.	42
Rajah 3.1	Carta alir kajian prestasi ikatan wayar emas untuk penyambungan dai bertindan	46
Rajah 3.2	Wafer Si yang diterima oleh pembekal dengan ketebalan 780 μm	48
Rajah 3.3	Pita pengisaran belakang yang terdiri daripada tiga lapisan iaitu filem asas, lapisan pelekat, dan filem pelepas	49
Rajah 3.4	Kedudukan pengisar semasa proses pengisaran belakang	50
Rajah 3.5	(a) Pandangan Sisi penempatan bilah pemotong semasa proses pemotongan (b) Bilah pemotong	52
Rajah 3.6	Lokasi 50 tapak pad pengikatan wayar pada pad Al dan dai di ambil daripada wafer Si	53
Rajah 3.7	(a) Skematik teknik percetakan skrin dan (b) Mesin pencetak skrin (DEK Horizon 8)	54
Rajah 3.8	4 Mesin Chip Shooter (Module of NXT III)	55
Rajah 3.9	Mesin ketuhar aliran semula (Pyramax Z12 150N)	56
Rajah 3.10	Profil pematerian aliran semula	56
Rajah 3.11	Mesin pelekatan dai (Fasford DB800)	58

Rajah 3.12	Pandangan sisi semasa proses pilih-dan-angkat	58
Rajah 3.13	Ilustrasi (a) pot rumah dan (b) ejektor	59
Rajah 3.14	Ilustrasi (a) tip getah dan (b) pemegang tip getah	60
Rajah 3.15	(a) Meja wafer Si (b) Ejektor dan kepala pengikat	60
Rajah 3.16	Ilustrasi skematik tindanan dai bagi: (a) kajian kes 1 dan 2 dan (b) kajian kes 3	62
Rajah 3.17	Profil suhu dan tekanan bagi ketuhar tekanan tinggi	62
Rajah 3.18	Langkah-langkah metodologi pengikatan wayar	65
Rajah 3.19	Carta alir bagi kajian kes 1 dan kajian kes 2	66
Rajah 3.20	Langkah penyediaan dai bagi kajian kes 1 dan kajian kes 2	67
Rajah 3.21	Ilustrasi wayar Ag dengan salutan Au (ACA)	68
Rajah 3.22	Carta alir bagi proses pembuatan wayar Ag dengan salutan Au (ACA)	69
Rajah 3.23	Carta alir bagi pembuatan wayar emas dengan ketulenan berbeza 2N, 3N, dan 4N.	73
Rajah 3.24	Ilustrasi sisi reka bentuk tergantung dalam pempakejan semikonduktor.	76
Rajah 3.25	Carta alir kajian kes 3	77
Rajah 3.26	Sampel kajian kes ketiga dengan jarak tergantung 150, 250, dan 350 μm .	78
Rajah 3.27	Mikroskop pengukuran Nikon MM-800	80
Rajah 3.28	Kaunter digital paksi X, Y, dan Z	81
Rajah 3.29	(a) Penempatan garis silang sebelum pengukuran. (b) Penempatan garis silang selepas pengukuran.	81

Rajah 3.30	Pengukuran Saiz Bola	82
Rajah 3.31	(a) Fokus pada permukaan pad. (b) Fokus pada permukaan bola yang diikat.	82
Rajah 3.32	Pengukuran Ketebalan Bola	83
Rajah 3.33	Sampel direndam dalam larutan NaOH 20%.	83
Rajah 3.34	Contoh imej skala kelabu bagi kawasan IMC pada permukaan ikatan bola	84
Rajah 3.35	Contoh liputan IMC yang diukur	84
Rajah 3.36	Nordson Stellar 4000 Dage Machine	85
Rajah 3.37	Mekanisme ujian ricihan bola	86
Rajah 3.38	Mekanisme ujian tarik wayar	86
Rajah 4.1	Dai yang telah dipisahkan pada Wafer	88
Rajah 4.2	(a) Sebelum proses pemotongan. (b) selepas proses pemotongan.	88
Rajah 4.3	Struktur susunan 4 Dai bertindan.	89
Rajah 4.4	(a) Struktur susunan bertindan dengan jarak gantung 150 μm (b) Struktur susunan bertindan dengan jarak gantung 250 μm (c) Struktur susunan bertindan dengan jarak gantung 350 μm	89
Rajah 4.5	Contoh sampel dari kajian bagi pengikatan wayar untuk 4 dai bertindan	90
Rajah 4.6	Pemetaan unsur wayar ACA dalam bentuk FAB melalui ujian EDX.	92
Rajah 4.7	Saiz ikatan bola Au (sampel A kawalan) dan ACA bagi proses pengikatan wayar yang berbeza (sampel B-F).	93

Rajah 4.8	Ketebalan ikatan bola Au (sampel A kawalan) dan ACA bagi proses pengikatan wayar yang berbeza (sampel B-F).	94
Rajah 4.9	Mikrograf pandangan atas bagi pembentukan ikatan bola bagi (a) Sampel A, (b) Sampel B, (c) Sampel C, (d) Sampel D, (e) Sampel E, dan (f) Sampel F	94
Rajah 4.10	Peratus liputan lapisan IMC bagi ikatan bola Au (sampel A kawalan) dan ACA bagi proses pengikatan wayar yang berbeza (sampel B-F).	96
Rajah 4.11	Mikrograf liputan lapisan IMC untuk: (a) Sampel A, (b) Sampel B, (c) Sampel C, (d) Sampel D, (e) Sampel E, dan (f) Sampel F	96
Rajah 4.12	Daya ricih bagi ikatan bola Au (sampel A kawalan) dan ACA bagi proses pengikatan wayar yang berbeza (sampel B-F).	97
Rajah 4.13	Mikrograf kawasan ikatan bola selepas ujian ricih bola bagi (a) Sampel A, (b) Sampel B, (c) Sampel C, (d) Sampel D, (e) Sampel E, dan (f) Sampel F	98
Rajah 4.14	Daya tarikan ikatan wayar Au (sampel A kawalan) dan ACA bagi proses pengikatan wayar yang berbeza (sampel B-F).	99
Rajah 4.15	Contoh sampel dari kajian bagi pengikatan wayar untuk 4 dai bertindan	102
Rajah 4.16	Gambar wayar Au dengan ketulenan 2N	102
Rajah 4.17	Gambar bola pengikatan bagi (a) Sampel 2N, (b) Sampel 3N, dan (c) Sampel 4N	103
Rajah 4.18	Histogram bagi saiz bola untuk sampel wayar 2N, 3N, dan 4N	104
Rajah 4.19	Histogram bagi ketebalan bola untuk sampel wayar 4N, 3N and 2N.	105

Rajah 4.20	Histogram bagi liputan IMC untuk wire purity 4N, 3N, dan 2N	107
Rajah 4.21	Histogram bagi kekuatan ricih bola untuk Kajian Kes 2	108
Rajah 4.22	Gambaran umum tentang gambar selepas ricih bola untuk (a) Sampel 2N, (b) Sampel 3N, dan (c) Sampel 4N	108
Rajah 4.23	(a) Struktur gantung dengan jarak 150 μ m, (b) Struktur gantung dengan jarak 250 μ m, (c) Struktur gantung dengan jarak 350 μ m.	111
Rajah 4.24	Pengikatan wayar pada struktur dai tergantung.	112
Rajah 4.25	Plot Pesongan dai menggunakan daya ikatan wayar 6-26 g bagi jarak dai tergantung (a) 150 μ m, (b) 250 μ m dan (c) 350 μ m	116
Rajah 4.26	Plot Pesongan dai menggunakan jarak dai tergantung 150-250 μ m bagi daya ikatan (a) 6 g, (b) 16 g dan (c) 26 g	119
Rajah 4.27	Imej SEM rekahan pada Si Dai bagi daya ikatan 26 g dan jarak gantungan 350 μ m	120
Rajah 4.28	Gambaran IMC pada penghujung dai selepas proses ikatan wayar bagi setiap daya ikatan dan nilai gantungan yang dikenakan.	122
Rajah 4.29	Gambaran IMC pada bahagian tengah dai selepas proses ikatan wayar bagi setiap daya ikatan dan nilai gantungan yang dikenakan.	123
Rajah 4.30	Pesongan dai Si semasa proses pengikatan wayar	127
Rajah 4.31	Jarak momen berubah mengikut kedudukan pad Al.	127

SENARAI SINGKATAN

2D	2 Dimensi
2N	2 (Nines) iaitu 99% ketulenan wayar
2.5D	2.5 Dimensi
3D	3 Dimensi
3N	3 (Nines) iaitu 99.9% ketulenan wayar
4N	4 (Nines) iaitu 99.99% ketulenan wayar
ACA	Perak Bersalut Emas
AEC	Majlis Elektronik Automotif (Automotive Electronics Council)
Ag	Perak
Ai	Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligent)
Al	Aluminum
AOI	Pemeriksaan Optik Automatik (Automatic Optical Inspection)
Au	Emas
B	Boron
Be	Berilium
BG	Pengisaran Belakang (Back Grind)
Bi	Bismut
Ca	Kalsium
Ce	Serium
Cu	Kuprum
Cu-Pd	Kuprum bersalut Paladium
CMOS	Semikonduktor Oksida Logam Pelengkap (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
Co	Kobalt
Cr	Kromium
CPU	Unit Pemprosesan Pusat (Central Processing Unit)
CV	Halaju (Constant Velocity)
DA	Prosess pelekatan dai (Die Attached)
DOE	Reka Bentuk Eksperimen (Design Of Experiment)
DP	Proses penyediaan dai (Die Preparation)
DRAM	Memori Rawak-Akses Dinamik (Dynamic Random-Access Memory)
EFO	Pelepasan Api Elektronik (Electronic Flame-Off)
FAB	Bola Bebas Udara (Free Air Ball)

FEA	Analisis Unsur Terhingga (Finite Element Analysis)
Ge	Germanium
GPU	Unit Pemrosesan Grafik (Graphic Processing Unit)
HAZ	Zon Terjejas Haba (Heat Affected Zone)
HBM	Memori Lebar Jalur Tinggi (High Bandwidth Memory)
HPC	Pengkomputeran Berprestasi Tinggi (High Performance Computing)
HRTEM	Mikroskop transmisi elektron beresolusi tinggi
HTST	Ujian penyimpanan suhu tinggi (High Temperature Storage Test)
iBGA	Susunan Grid Bola Pengimejan (Imaging Ball Grid Array)
IC	Litar Bersepadu (Integrated Circuit)
In	Indium
IMC	Sebatian Antara Logam
La	Lantanum
LED	Dioda pemancar cahaya
Li	Litium
LSI	Integrasi Skala Besar (Large Scale Integration)
ML	Pembelajaran Mesin (Machine Learning)
Ni	Nikel
PCT	Ujian periuk tekanan (Pressure Cooker Test)
Pd	Paladium
Pt	Platinum
Ru	Rutenium
SEM	Mikroskop Imbasan Elektron
Si	Silikon
SMT	Teknologi Lekapan Permukaan
TSV	Laluan melalui silikon (Through Silicon Via)
Ti	Titanium
USG	Tenaga Ultrasonik
Y	Yterbium
Zn	Zink

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 PENGENALAN

Teknologi ikatan wayar merupakan salah satu teknik yang penting dalam pempakejan elektronik. Ikatan wayar ini berfungsi untuk menghubungkan cip semikonduktor ke substrat atau kerangka kaki (leadframe) menggunakan wayar logam yang halus berdiameter sekitar 25 μm (Wang et al. 2023). Ikatan wayar memberikan laluan elektrik untuk kebolehfungsian elektronik yang mana ianya membolehkan isyarat bergerak masuk dan keluar daripada cip. Ikatan wayar ini merupakan salah satu langkah penting dalam penghasilan litar bersepadu (IC). Selain daripada memastikan sambungan elektrik yang stabil, ikatan wayar haruslah kebolehhidupan yang baik antara komponen dalaman cip dan litar luar supaya komponen elektronik ini dapat berfungsi dalam suatu jangka masa yang lama.

Ikatan wayar ini biasanya melibatkan penggunaan wayar logam yang halus, yang biasanya diperbuat daripada emas (Au), aluminium (Al), atau kuprum (Cu) (Huang et al. 2025; Li et. al. 2022; Zhang et al. 2022). Ikatan wayar ini menghubungkan dai semikonduktor kepada substrat pakej elektronik. Dalam teknologi pakej elektronik, ikatan wayar ini menjadi pilihan kerana kelebihannya dari segi kebolehhidupan, fleksibiliti, dan kos yang berpatutan. Tambahan pula, ikatan wayar ini dapat dilakukan terutamanya untuk industri pembuatan elektronik dengan jumlah yang tinggi.

Terdapat tiga jenis teknik ikatan wayar yang utama iaitu ikatan termomampatan, ikatan ultrasonik dan ikatan termosonik. Ikatan termomampatan menggabungkan haba

dan tekanan untuk mengikat wayar kepada pad. Ikatan ultrasonik merupakan ikatan yang menggunakan tenaga ultrasonik untuk menghasilkan ikatan melalui getaran frekuensi tinggi, biasanya tanpa memerlukan haba. Manakala, ikatan termosonik merupakan kaedah ikatan wayar yang paling tipikal iaitu menggunakan kedua-dua haba dan tenaga ultrasonik untuk mencapai ikatan. Setiap teknik ikatan wayar ini mempunyai kelebihan masing-masing dan ianya tertakluk kepada aplikasi khusus bergantung kepada bahan yang digunakan dan ciri prestasi yang diperlukan (Chen et al. 2023).

Proses pengikatan wayar ini memerlukan peralatan khas, seperti mesin ikatan wayar, yang merupakan mesin yang mampu mengendalikan wayar halus dengan kejutan tinggi. Mesin ini biasanya dilengkapi dengan alat kapilari atau alat baji yang kan membentuk ikatan wayar serta menggunakan daya dan tenaga yang diperlukan untuk menghasilkan ikatan. Pemilihan bahan wayar adalah sangat penting. Ikatan wayar jenis Au menjadi pilihan kerana konduktiviti yang baik dan kemudahan untuk diikat. Ikatan wayar jenis Al dan Cu dipilih kerana kos yang lebih rendah dan keperluan aplikasi tertentu. Wayar Cu pula semakin popular disebabkan konduktiviti elektrik dan terma yang tinggi, serta kos yang lebih rendah. Walaubagaimanapun, wayar Cu ini memerlukan kawalan proses yang teliti bagi menangani masalah pengoksidaan dan memastikan kebolehharian ikatan. Penggunaan wayar perak adalah jarang dan biasanya terhad kepada bentuk aloi tertentu untuk aplikasi khusus, bukannya pilihan utama untuk ikatan wayar. Secara amnya, diameter wayar untuk pengikatan wayar adalah sekitar julat daripada 15 μm hingga beberapa ratus mikrometer, bergantung pada aplikasi. Justeru itu, banyak kajian dilakukan untuk memahami tentang bagaimana bahan utama seperti Au, Al, dan Cu berprestasi di bawah tekanan mekanik dan terma. Kesan jenis ikatan wayar yang berbeza, jenis-jenis proses pengikatan wayar serta dengan reka bentuk pakej elektronik termasuk reka bentuk dai bertindan adalah sangat penting untuk difahami dan diterokai (Cheng et al. 2023).

Walaubagaimanapun, pada masa kini, teknologi ikatan wayar berhadapan dengan cabaran yang semakin ketara terutama untuk aplikasi pakej dai bertindan (stacked die) dan seni bina kompleks. Susunan lapisan cip bertindan dan struktur multidimensi ini akan meningkatkan risiko seperti kerosakan terma, mekanik, dan elektrik. Ini disebabkan oleh tekanan ikatan wayar yang tidak sekata dan tidak stabil.

Maka, pemahaman terhadap prestasi ikatan wayar dalam pakej elektronik yang mempunyai dai bertindan adalah sangat penting untuk menjamin struktur integriti sambungan dan prestasi keseluruhan cip seiring dengan perkembangan pakej elektronik yang semakin miniatur dan padat.

Ikatan wayar digunakan secara meluas dalam pelbagai aplikasi, dari produk elektronik untuk pengguna biasa hinggalah kepada produk elektronik untuk industri automotif dan aeroangkasa. Ini adalah disebabkan oleh kepelbagaian julat keboleharapan ikatan wayar. Seiring dengan kemajuan teknologi semikonduktor, ikatan wayar juga sedang menyesuaikan diri dengan cabaran baharu, seperti pengintegrasian lebih banyak fungsi pada satu dai, ketumpatan kuasa yang lebih tinggi, dan keperluan untuk penyelesaian pempakejan yang lebih padat dan cekap. Seiring dengan pengecilan produk elektronik seperti dalam teknologi baru seperti pic halus (fine pitch), teknologi ikatan wayar dan penggunaan bahan baharu membuka jalan untuk inovasi yang berterusan terutama untuk industri pembuatan pakej semikonduktor.

Dalam usaha memenuhi keperluan untuk fungsi yang lebih kompleks dan saiz yang lebih kecil, pengenalan teknologi dai bertindan menjadi satu inovasi penting dalam pempakejan elektronik. Teknologi ini melibatkan penyusunan beberapa lapisan dai secara menegak dalam satu pakej yang sama, membolehkan peningkatan kepadatan fungsi, pengurangan jarak isyarat, dan penjimatan ruang fizikal. Walaupun reka bentuk dai bertindan ini dapat menawarkan kelebihan dari segi prestasi dan miniaturisasi, dai bertindan juga menimbulkan cabaran reka bentuk dan pembuatan yang kompleks, termasuk pengurusan haba, kekuatan mekanikal, serta keperluan sambungan elektrik yang tepat dan tahan lasak antara lapisan-lapisan dai tersebut. Untuk menyambungkan dai bertindan tersebut, ikatan wayar digunakan sebagai kaedah utama dalam menghasilkan sambungan elektrik antara lapisan-lapisan dai yang bertindan. Justeru itu, ikatan wayar untuk konfigurasi dai bertindan perlu disesuaikan contohnya seperti geometri yang kompleks, termasuk lapisan dai yang berbilang, saiz dai yang berbeza, dan susun atur pad ikatan yang rumit. Salah satu ciri utama yang sering ditemui dalam pakej ini ialah struktur dai yang tergantung (overhang), di mana dai atas melangkaui sebahagian tapak dai di bawah. Keadaan reka bentuk lapisan dai-dai ini membentuk kawasan dai yang tergantung. Kawasan dai tergantung ini merupakan zon yang sensitif

secara mekanikal kerana ia mengalami tekanan tertumpu semasa proses ikatan wayar dan kitaran haba operasi, sekali gus meningkatkan risiko kegagalan ikatan akibat delaminasi atau retak.

Dari aspek yang lain pula, persekitaran mekanik yang kompleks pada struktur dai tergantung memerlukan pemeriksaan yang lebih mendalam tentang bagaimana pelbagai parameter reka bentuk seperti panjang, sudut, dan kedudukan tergantung juga mempengaruhi kekuatan dan jangka hayat ikatan wayar. Tekanan mekanik yang terhasil daripada proses pemasangan dan kitaran haba semasa operasi peranti boleh menyebabkan kegagalan awal ikatan wayar. Oleh itu, pemahaman tentang hubungan antara struktur dai dan integriti ikatan wayar adalah sangat penting untuk mengoptimumkan reka bentuk pakej, meningkatkan hasil pembuatan, dan memastikan kebolehharian peranti elektronik untuk jangka masa panjang.

Penyelidikan berkaitan ikatan wayar dalam pakej dai bertindan dan dai tergantung ini akan dapat mengisi jurang pengetahuan penting berkaitan dengan cabaran bahan dan struktur dalam ikatan wayar untuk pakej semikonduktor dai bertindan. Penemuan daripada kajian ini dijangka dapat memberi manfaat kepada pihak industri pembuatan pakej elektronik dalam memilih bahan ikatan wayar yang bersesuaian dengan aplikasi produk elektronik. Selain itu, hubungkait parameter reka bentuk dai, proses ikatan wayar dapat difahami sekaligus dapat mengurangkan tekanan mekanik yang berkaitan dengan struktur tergantung. Akhirnya, hasil kajian ini akan menyumbang kepada peningkatan kebolehharian, prestasi, dan jangka hayat terutama bagi peranti semikonduktor termaju.

1.2 PERMASALAHAN KAJIAN

Teknologi ikatan wayar pada kini tertumpu kepada penggunaan ikatan wayar jenis Au dan Cu, tertakluk kepada aplikasi produk elektronik. Walaubagaimanapun, ikatan wayar jenis Au melibatkan kos yang tinggi manakala ikatan wayar Cu sangat terdedah kepada kakisan. Seperti di Rajah 1.1, fluktuasi dan peningkatan berterusan harga Au sehingga 2025 telah memberi kesan yang ketara terhadap pemilihan bahan dalam proses

pengikatan wayar industri pempakejan semikonduktor. Kenaikan harga Au secara berterusan telah mewujudkan cabaran kepada pengeluar untuk mengawal kos pengeluaran sambil mengekalkan kebolehharian dan hasil produk yang tinggi. Pelbagai kajian telah meneliti dinamik harga Au menggunakan metodologi lanjutan. Liu (2021) telah mengenal pasti hubung kait yang ketara antara harga Au dan faktor seperti harga minyak, S&P 500, serta DXY, dengan dasar monetari Rizab Persekutuan memainkan peranan yang penting. Hung (2024) berpendapat bahawa harga Au dijangka mengekalkan trajektori kenaikan sehingga tahun 2025, walaupun pembetulan sederhana dalam jangka pendek masih berkemungkinan berlaku.



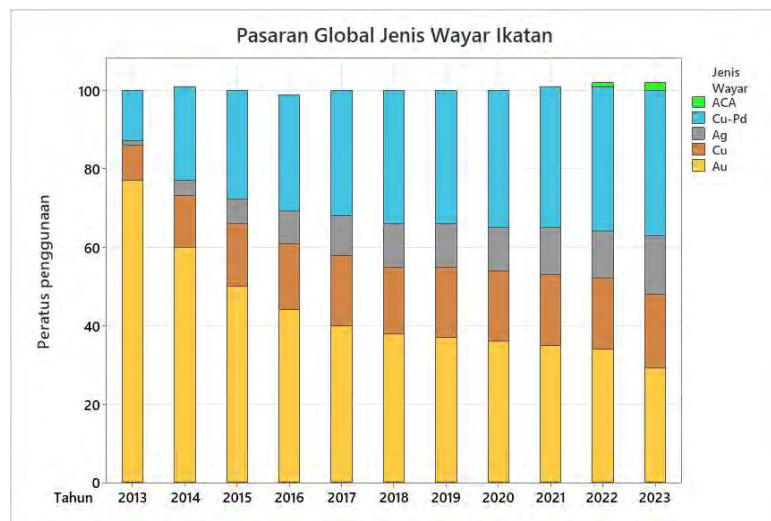
Rajah 1.1 Harga Au 10 tahun dalam MYR/g.

Sumber: Bolden (2025)

Menurut laporan daripada laman sesawang (DataHorizon Research 2024), peningkatan harga Au telah mendorong syarikat semikonduktor untuk melaksanakan langkah pengurangan kos melalui penggantian bahan dan pendekatan pengikatan hibrid. Peralihan yang paling ketara ialah penggunaan wayar pengikatan Cu dan kuprum disalut paladium (Cu-Pd) sebagai pengganti Au, kerana bahan ini menawarkan prestasi pengikatan yang sebanding pada kos yang jauh lebih rendah. Tanaka Precious Metals (2024) melaporkan bahawa wayar Cu-Pd menunjukkan ketahanan terhadap kakisan dan

kestabilan termo-mekanikal yang lebih baik, menjadikannya sesuai untuk aplikasi pic halus dan frekuensi tinggi di samping mengurangkan kesan turun naik harga Au.

Trend ini sejajar dengan hubungan umum antara pergerakan harga komoditi dan inovasi teknologi dalam bahan pempakejan. Ketika harga Au mencapai tahap tertinggi dalam awal tahun 2020-an, pengeluar semikonduktor mempercepatkan penerapan teknologi pengikatan berasaskan Cu bagi memastikan kelestarian ekonomi jangka panjang (DataHorizzon Research 2024). Walaupun peralihan ini berlaku secara meluas, wayar pengikatan Au masih mengekalkan peranannya dalam aplikasi berkeperluan kebolehharian tinggi seperti sektor automotif, aeroangkasa, dan sektor logik termaju (advanced logic sector), di mana kebolehikatan terbaik dan ketahanan terhadap pengoksidaan kekal sebagai faktor penting (Tanaka Precious Metals 2024). Namun begitu, pengembangan berterusan teknologi pengikatan Cu dan Cu-Pd mencerminkan perubahan struktur dalam pasaran wirebonding yang dipacu oleh peningkatan harga Au serta usaha industri untuk mengoptimumkan prestasi dan kos. Oleh itu, pengaruh harga Au tidak hanya terhad kepada nilai komoditi semata-mata, tetapi turut membentuk arah inovasi bahan dan strategi pembuatan dalam pempakejan semikonduktor sepanjang dua dekad yang lalu (DataHorizzon Research 2024).



Rajah 1.2 Peratusan penggunaan jenis wayar dalam industri pengikatan wayar.

Sumber: DataHorizzon Research (2024)

Walaupun wayar Cu lebih banyak digunakan di industri semikonduktor, namun ianya tidak sesuai digunakan pada dai yang nipis dan sensitif kerana sifat fizikalnya yang keras akan mengakibatkan kerosakan pada cip atau permukaan ikatan. Ag, bahan yang lebih lembut, adalah calon yang baik untuk menggantikan Cu sebagai wayar ikatan kos rendah alternatif (Lu 2013).

Banyak juga kajian dijalankan untuk mendapatkan ikatan wayar jenis Ag yang dapat memberikan prestasi yang setara dengan ikatan wayar Au. Kajian ini menyelidiki tentang kesan salutan Au pada wayar Ag terhadap prestasi pengikatan wayar. Walaupun salutan Au diketahui dapat meningkatkan ketahanan terhadap kakisan dan meningkatkan kualiti sambungan elektrik, impak spesifiknya dari segi kualiti ikatan wayar termasuklah pembentukan liputan sebatian antara logam (IMC) dan kekuatan mekanik bagi wayar Ag berdiameter 0.7 mil (17.78 μm) masih kurang diterokai dan belum dikaji dengan mendalam.

Ketulenan bahan memainkan peranan penting dalam menentukan sifat mekanik, kestabilan sambungan, dan kekuatan ikatan wayar. Ketidakjelasan hubungan antara tahap ketulenan wayar sebagai ikatan wayar merupakan cabaran dalam memahami teknologi ikatan wayar dalam pempakejan elektronik. Walaupun tahap ketulenan seperti 2N (99%), 3N (99.9%), dan 4N (99.99%) digunakan secara meluas, kesan tahap ketulenan tersebut terhadap wayar Au berdiameter 0.7 mil (17.78 μm) secara khusus masih kurang mendapat perhatian dalam kajian terdahulu. Kajian ini akan menyelidiki kesan variasi ketulenan wayar Au terhadap kualiti pengikatan dan prestasi mekanik ikatan wayar. Oleh itu, kajian ini bertujuan untuk menyelidik bagaimana variasi ketulenan tersebut mempengaruhi kualiti pengikatan dan prestasi mekanik ikatan wayar bagi meningkatkan pemahaman dan keberkesanan penggunaan wayar Au dalam aplikasi pempakejan elektronik (Sešek & Makarovič, 2022).

Penggunaan pakej dai bertindan semakin penting dalam industri semikonduktor untuk aplikasi berkepadatan tinggi dan berprestasi tinggi. Ciri utama reka bentuk ini ialah struktur dai yang bertindan melibatkan lapisan dai-dai. Struktur dai semakin kompleks apabila melibatkan lapisan dai yang disusun dalam bentuk tergantung. Struktur ini membawa cabaran mekanik yang kritikal terhadap prestasi pengikatan

wayar. Hal ini adalah kerana tekanan dan pergerakan mikro pada kawasan ikatan wayar boleh mengakibatkan kegagalan mekanik contohnya seperti berlakunya retak pada dai yang seterusnya akan menyebabkan kehilangan sambungan elektrik. Tekanan mekanik dan ketegangan ini semakin ketara terutama dalam konfigurasi bertindan yang padat, yang boleh menjejaskan kebolehharapan dan ketahanan jangka panjang pakej elektronik. Oleh itu, kajian ini bertujuan untuk memahami kesan struktur tiga jenis reka bentuk dai tergantung terhadap prestasi pengikatan wayar dalam pakej dai bertindan yang kompleks ini. Ilmu dan pemahaman tentang prestasi ikatan wayar pada pakej dai bertindan dan tergantung ini akan memberikan asas penting untuk memperbaiki rekabentuk dan proses pembuatan pempakejan semikonduktor. Dengan mengetahui secara tepat bagaimana tekanan mekanik, pergerakan mikro, serta variasi bahan ikatan wayar dan struktur mempengaruhi kualiti dan kebolehharapan ikatan wayar, pihak industri elektronik akan mendapat manfaat dalam mengoptimumkan bahan, teknik, dan reka bentuk dai dan pakej elektronik bagi memanjangkan jangka hayat serta meningkatkan prestasi produk elektronik berprestasi tinggi dan berkepadatan tinggi. Ilmu pengetahuan dalam teknologi ikatan wayar ini juga akan menyokong pembangunan teknologi pempakejan yang lebih cekap dari segi kos dan daya tahan, sekaligus memperkukuh daya saing dalam pasaran semikonduktor global yang sentiasa berubah dengan pesat.

1.3 OBJEKTIF KAJIAN

Kajian ini memberi fokus terhadap prestasi pengikatan wayar terhadap pakej dai bertindan. Kajian ini menggariskan tiga objektif yang utama iaitu:

- i. Untuk mengkaji kesesuaian proses penyambungan wayar Ag bersalut Au
- ii. Untuk mengenalpasti prestasi ikatan wayar berasaskan ketulenan wayar emas yang berbeza
- iii. Untuk menentusahkan kesan dimensi struktur dai tergantung terhadap prestasi ikatan wayar dalam pakej dai bertindan

1.4 SKOP KAJIAN

Skop kajian terbahagi digariskan berdasarkan kepada 3 objektif kajian.

Skop kajian untuk mencapai objektif pertama:

- i. Fokus kepada kesan salutan Au pada wayar Ag terhadap prestasi pengikatan wayar dalam pakej dengan struktur dai bertindan.
- ii. Wayar perak bersalut emas (ACA) dengan diameter keseluruhan wayar sebanyak 17.78 μm .
- iii. Ujian prestasi dilaksanakan pada rekaan bentuk pakej sebenar tanpa struktur dai tergantung.
- iv. Penilaian prestasi termasuk ujian tarikan wayar, ujian ricihan bola dan penilaian liputan IMC.

Skop kajian bagi objektif kedua;

- i. Fokus kepada kesan tahap ketulenan wayar emas terhadap prestasi pengikatan wayar dalam pakej dai bertindan
- ii. Ketulenan wayar Au yang berbeza (99%, 99.9% dan 99.99%) dengan diameter wayar yang sama iaitu 17.78 μm .
- iii. Penilaian prestasi termasuk ujian ricihan bola, ujian tarikan wayar, saiz bola, ketebalan bola, dan liputan IMC.

Skop kajian bagi objektif ketiga;

- i. Fokus kepada kesan struktur dai tergantung (overhanging die structure) terhadap prestasi pengikatan wayar.
- ii. Diameter wayar Au yang digunakan adalah 17.78 μm dengan ketulenan 99%
- iii. Viarasi kepada jarak tergantung 150,250 dan 350 μm dengan ketebalan dai 31 μm .
- iv. Pengukuran tekanan mekanik pada pad Al melalui bacaan pesongan (deflection).
- v. Pemerhatian kerosakan seperti retakan mikro menggunakan mikroskop optik.
- vi. Penilaian liputan IMC bagi menilai prestasi pengikatan wayar.

1.5 ORGANISASI TESIS

Tesis ini disusun secara berurutan dari bab 1 hingga bab 5. Bab 1 menjelaskan tentang, teknologi ikatan wayar semasa, objektif, skop penyelidikan, dan had dalam kajian ini. Bab 2 mengandungi ulasan literatur yang menerangkan konsep asas kajian penyelidikan ini. Ia juga merangkumi kajian-kajian terdahulu dengan analisis terperinci mengenai skop projek. Bab 3 memperincikan metodologi kajian yang meliputi penyediaan sampel, ujian yang dijalankan, pemerhatian, pengumpulan data, dan analisis yang dilakukan untuk melengkapkan penyelidikan. Bab 4 akan mengandungi perbincangan dan keputusan kajian. Perbincangan yang dikemukakan berdasarkan keputusan kajian adalah berlandaskan objektif kajian. Pada bab terakhir, Bab 5, akan menyimpulkan semua penemuan dan memberikan cadangan untuk kajian masa depan dalam topik yang serupa. Rujukan disenaraikan di akhir tesis dan dirujuk sepanjang Bab 1 hingga Bab 4.

RUJUKAN

- An, B., Zhou, H., Cao, J., Ming, P., Persic, J., Yao, J., & Chang, A. 2023. A review of silver wire bonding techniques. *Micromachines*, 14 (11), 2129.
- Anand, S., Brunnschweiler, D., Swarbrick, G., & Russell, S. 2022. Mechanical bonding. In *Elsevier eBooks* (pp. 301–393).
- Azahar, A. Z., Bakar, M. A., Jalar, A., & Ani, F. C. 2024. Effect of die deflection during Au wire bonding process on bonding quality in overhang semiconductor package. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(12), 5836-5845.
- Azahar, A.Z., Abu Bakar, M., Jalar, A. 2025. A Comparative Study of Mechanical Properties in Gold with Different Purity Wire Bonding. In: Abdul Razak, N.R., Mohd Salleh, M.A.A., Che Halin, D.S., Abdul Razak, K., Somidin, F., Baser, M.F.H. (eds) Proceedings of the Green Materials and Electronic Packaging Interconnect Technology Symposium. ECOOP 1996. Springer Proceedings in Physics, vol 418. Springer.
- Baek, K., Kim, J., Han, M., Lim, K., & Rhee, D. M. 2023. Chip level evaluation of wafer-to-wafer direct bonding strength with bending test. *IEEE*, 310–317.
- Bolden, M. 2025. Gold Surges, Sinks, and Stabilizes Amid Fed Pushback and Data Delays <https://goldprice.org/news/gold-surges-sinks-and-stabilizes-amid-fed-pushback-and-data-delays>
- Cai, X. H., Li, J. D., & Lin, X. R. 2014. Study on electromigration failure of high performance Ag-4Pd alloy wire. In Proceedings of the 2014 Cross-Strait Destruction Science and Materials Testing Academic Conference and the 12th Destruction Science Symposium/The 10th National MTS Materials Testing Academic Conference, Taiwan, China
- Cang, D., Dong, Z., Lv, S., Zhou, C., Cai, Z., Zhang, P., Sun, H., Zhao, J. 2026. Design and intelligent optimization of TSV-based embedded microchannel heatsinks in 2.5D Packaging. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 255(2), 127908.
- Cao, J., Fan, J. L., Liu, Z. Q., & Zhang, Y. M. 2015. Effect of silver alloy bonding wire properties on bond strengths and reliability. In Proceedings of the ICEP-IAAC, Kyoto, Japan.

- Cao, J., Liu, W., Wei, J., Tang, H., Shen, X., Ding, Y., Song, K., Zhou, Y., & Cui, C. 2025. Advances in copper wire bonding technology: Material optimization, interfacial strength bonding interface reliability, and corrosion resistance. *Journal of Alloys and Compounds*, 1032, 181108.
- Cao, J., Wu, W. X., Zhang, C., Hua, H., & Xu, X. 2018. Effects of heat treatment temperature on properties and microstructure of Ag-4Pd alloy bonding wire. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 39, 44–48.
- Cao, J., Zhang, J. C., Persic, J., & Song, K. X. 2020. Effects of bonding parameters on free air ball properties and bonded strength of Ag-10Au-3.6Pd alloy bonding wire. *Micromachines*, 11, 777.
- Carluccio, R., Caglio, C., Alesi, M., Mancaloni, A., Villa, R., Serafini, A., & Dellasega, D. 2024. Influence of Material Composition on Copper-Aluminum Wire Bonding Reliability. *IEEE*, 519–525.
- Chen, C. H., Lee, P. I., & Chuang, T. H. 2022. Microstructure evolution and failure mechanism of electromigration in Ag-alloy bonding wire. *Journal of Alloys and Compounds*, 913, 165266.
- Chen, C. H., Lin, Y. C., & Chuang, T. H. 2021. Grain growth and twin formation in a Ag-4Pd alloy ribbon after annealing treatments. *Journal of Alloys and Compounds*, 863, 158619.
- Chen, L., & Liu, Y. 2023. Modeling and Optimization of Mechanical Performance for Cu Wire Bonding Process. In *2023 IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* (pp. 386-391). IEEE.
- Chen, Z., Zhang, J., Wang, S., & Wong, C. 2023. Challenges and prospects for advanced packaging. *Fundamental Research*, 4(6), 1455–1458.
- Cheng, X., Yang, K., Liu, S., Ji, S., & Wang, J. 2023. Microstructure and mechanical properties of ultrasonic welded copper to aluminum cables joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 33(10), 3027–3038.
- Cho, J. S., Yoo, K. A., Moon, J. T., Son, S. B., Lee, S. H., & Oh, K. H. 2012. Pd effect on reliability of Ag bonding wires in microelectronic devices in high-humidity environments. *Metallurgical and Materials Transactions International*, 18, 881–1885.
- Chuang, T. H., Chang, C. C., Chuang, C. H., Lee, J. D., & Tsai, H. H. 2013a. Formation and growth of intermetallics in an annealing-twinned Ag-8Au-3Pd wire bonding

- package during reliability tests. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 3, 3–9.
- Chuang, T. H., Wang, H. C., Chuang, C. H., Lee, J. D., & Tsai, H. H. 2013b. Effect of annealing twins on electromigration in Ag-8Au-3Pd bonding wires. *Journal of Electronic Materials*, 42, 545–551.
- DataHorizon Research Semiconductor Gold Bonding Wire Market Size, Growth & Analysis Report 2024-2033, 2024. <https://datahorizonresearch.com/semiconductor-gold-bonding-wire-market-20105>
- Dong, Y., Zhang, J., Ma, Q., Yan, X., Zhang, P., Yang, L. 2022. Process Simulation of Gold Wire Ball Thermosonic Bonding for Hybrid Integrated Circuits. 2022 23RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC PACKAGING TECHNOLOGY (ICEPT), Dalian, China, 1-6.
- Du, Y., Gao, L. Y., Yu, D., & Liu, Z. Q. 2020. Comparison and mechanism of electromigration reliability between Cu wire and Au wire bonding in molding state. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(4), 2967-2975.
- Eto, M., Araki, N., Yamada, T., Klengel, R., Klengel, S., Petzold, M., Sugiyama, M., & Fujimoto, S. 2020. Effects of alloying elements in high reliability copper wire bond material for high temperature applications. *Microelectronics Reliability*, 114, 113819.
- Fan, J. L., Cao, J., Gao, W. B., & Liu, Z. Q. 2016. Effect of coating speed and annealing on properties of direct Pd-coated copper bonding wire. *Heat Treat. Met*, 41, 89-93.
- Fan, J. L., Zhu, L. X., Cao, J., & Hua, H. 2019. Effect of Au component in Ag alloy bonding wire on bonded strength and bonded reliability. *Functional Materials*, 50, 10145–10148.
- Fan, J. Zhu, L., Yang, F., Cao, J., Zhang, J., Wang, F. 2025. Study of free-air-ball and bonding properties of Ag–Au–Pd alloy wires. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 35(5), 055004.
- Flauta, R., Garete, A.J., Farrugia, M.L., Sekaran, S. & Chen, H. 2022. Reliability of Ag bonding wires and its coated variants from the perspective of IMC degradation and its correlation to wire and epoxy molding compound material properties

- under corrosive environment. 2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC) (2022): 2071-2077.
- Gam, S. A., Kim, H. J., Cho, J. S., Park, Y. J., Moon, J. T., & Paik, K. W. 2006. Effects of Cu and Pd addition on Au bonding wire/Al pad interfacial reactions and bond reliability. *Journal of Electronic Materials*, 35, 2048–2055.
- Gan, C.L. & Huang, C.Y. 2023. Advanced Memory and Device Packaging. In: *Interconnect Reliability in Advanced Memory Device Packaging*. Springer Series in Reliability Engineering. Springer, Cham.
- Gu, Y., & Huo, Y. 2023. Advanced electronic packaging technology: from hard to soft. *Materials*, 16(6), 2346.
- Guo, R., Gao, L. M., Li, M., Mao, D. L., Qian, K. Y., & Chiu, H. 2015. Microstructure evolution of Ag-8Au-3Pd alloy wire during electromigration. *Materials Characterization*, 110, 44–51.
- Hamid, K. A., Badarisman, A. H., Jalar, A., & Bakar, M. A. 2022. Investigation of integrated factors in the occurrence of copper wire bonding corrosion of semiconductor packages. *Journal of Physics Conference Series*, 2169(1), 012016.
- He, J., Liu, Y., Bo, Y. & Ye, N. 2024. Analysis of Stacked Overhang Die Stress During Wire Bonding. 2024 IEEE 26th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC) (2024): 859-863.
- Hong, H. L., Yang, C. H., Wang, K. C., Gao, H., & Yan, H. X. 2021. Composition analysis of AU–AG and AU–CU solid solution alloys by Friedel’s periodic spherical oscillation model. *Modern Physics Letters B*, 35(29), 2141015.
- Hsueh, H. W., Hung, F. Y., Lui, T. S., Chen, L. H., & Chang, J. K. (2014). Microstructure, electric flame-off (EFO) characteristics and tensile properties of silver–lanthanum alloy wire. *Microelectronics Reliability*, 54, 2564–2569.
- Huang, B.C., Wu, B.D., Huang, C.T., Hung, F.Y., Zheng, J.Y. 2025. Sputtered ultra-thin Au coating on Cu wire: enhancing ball formation and reliability for advanced wire bonding. *J Mater Sci: Mater Electron* 36, 864.
- Humpston, G., Jacobson, D.M. A new high strength gold bond wire. 1992. *Gold Bull* **25**, 132–145
- Hung, N.V. 2024. Forecasting Gold Price Using Technical Analysis Indicator. *INTERNATIONAL JOURNAL*, 6(12), 788-797.10.51594/ijae.v6i12.1753

- Hung, R., See, G., Wang, Y., Yong, C. B., Zheng, K., Chang, Y., Shantaram, A., Wang, R., Sundarrajan, A., Abdilla, J., Hegde, N., Schmid, S., Bikaljevic, D., & Glantschnig, M. 2024. Enabling Die-to-Wafer Hybrid Bonding for the Next Generation Advanced 3D Packaging. *IEEE*, 778–783.
- Jaafar, N.B. & Choong, C.S. 2022. Establishment of Highly Dense Wire Bonding with Insulated Au Wire. 2022 IEEE 24th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC) (2022): 352-356.
- Jasmee, S., Palagud, J., Wang, S.W., Hoo, K.I., Masdzarif, N.D.I., Lim, T.S. & Omar, G. 2024. Free air ball and bondability behaviours of Au-coated Ag alloy wire at various electro flame-off and bonding parameters for CMOS iBGA. *J Mater Sci: Mater Electron* 35, 1502.
- JEDEC Solid State Technology Association. (2017). JESD22-B116B: Wire bond shear test. JEDEC.
- JEDEC Solid State Technology Association. (2018). JESD47J: Stress-test-driven qualification of integrated circuits. JEDEC.
- JEDEC Solid State Technology Association. (2022). JESD22-B120: Wire bond pull test methods. JEDEC.
- Kaimori, S., Nonaka, T., & Mizoguchi, A. 2006. The development of Cu bonding wire with oxidation-resistant metal coating. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 29(2), 227-231.
- Kang, F. F., Zhou, W. Y., & Wu, Y. J. 2018. Microstructure and properties of gold-coated silver composite bonding wire for microelectronic package. *Semiconductor Technology*, 43, 702–707.
- Kim, M., Choi, M., Choi, S., & Jeong, S. 2023. Semiconductor Nanocrystals: Unveiling the Chemistry behind Different Facets. *Accounts of Chemical Research*, 56(13), 1756–1765.
- Lau, J. H. 2022. Recent advances and trends in advanced packaging. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 12(2), 228–252.
- Lay, N., DiNapoli, N., Rahim, K., Razmyar, S. & Holliday, M. 2023. Pre-Applied Underfill Technique for Fine-Pitch Cu Pillar 3D Die Stacking to Enable 2.5/3D Advanced Packaging. *IMAPSource Proceedings 2022 (IMAPS Symposium)*: 000273–79.

- Li, J. H., Liu, L. G., Ma, B. K., Deng, L. H., & Han, L. 2011. Dynamics features of Cu-wire bonding during overhang bonding process. *IEEE Electron Device Letters*, 32, 1731–1733.
- Li, J., Zhang, X., Liu, L., & Han, L. 2012. Interfacial characteristics and dynamic process of Au-and Cu-wire bonding and overhang bonding in microelectronics packaging. *Journal of microelectromechanical systems*, 22(3), 560-568.
- Li, X., Lu, G.Q., Mei, Y.H. 2022. Reliable Aluminum Wire-Bonded SiC/Si Diodes With Laminated Al/Cu Stress Buffers, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 37(9), 10149-1015.
- Liu, A., Zhang, X., Liu, Z., Li, Y., Peng, X., Li, X., Qin, Y., Hu, C., Qiu, Y., Jiang, H., Wang, Y., Li, Y., Tang, J., Liu, J., Guo, H., Deng, T., Peng, S., Tian, H., & Ren, T. 2024. The roadmap of 2D materials and devices toward chips. *Nano-Micro Letters*, 16(1), 119.
- Liu, W. 2021. Gold Price Analysis and Prediction based on Pearson Correlation Analysis. *ICCIR*, 358–361. <https://doi.org/10.1145/3473714.3473777>
- Long, Y. Y., Arndt, M., Dencker, F., Wurz, M., Twiefel, J., & Wallaschek, J. 2022. Impact of surface texture on ultrasonic wire bonding process. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 1828–1838.
- Lu, Charlie. 2013. Review on silver wire bonding. 2013 8th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT) (2013): 226-229.
- Lu, J., Zhan, M., Yu, J., Yu, X., Duan, Y., Chen, S., Xu, M., Lu. W. 2025. Insight on the Electronic, Elastic and Thermal Properties of Au-Al Intermetallic Compounds Based on First-Principles Calculations. *Journal of Electronic Materials*, 53(7), 3809.
- Lu, T., Lee, P., & Wu, Y. S. 2024. Effect of compressive stress on copper bonding quality and bonding mechanisms in advanced packaging. *Materials*, 17(10), 2236.
- Murali, S., Evonne, L. Y. W., Mariyappan, D., Wan, L. M., Joanne, C. M. H., Kumar, B. S., & SS, K. S. 2023. High robustness of coated-Ag wire bonding. *IMAPSource Proceedings*, 2022(1), 000306-000310.
- Nguyen, D. N., Dang, M. P., Dixit, S., & Dao, T. 2022. A design approach of bonding head guiding platform for die to wafer hybrid bonding application using

- compliant mechanism. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(6), 2855–2866.
- Palagud, J., Lim, T.S., Jasmee, S., Masdzarif, N.D.I., Wang, S.W., Hoo, K.I. & Omar, G. 2023. Analysis on bonding wires of Au-Coated Ag alloy for IBGA automotive application.” 2023 IEEE 25th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC) (2023): 524-529.
- Papadopoulos, C., Villiger, T., Steiner, S., Prinz, J., Morabito, C., Cammarata, M., Rodriguez, A., Geilenkeuser, R., Breuer, D., Kuechenmeister, F., Dienelt, J., Urban, J., Kabus, H., & Krinke, J. 2020. Gold wire bond study for automotive application. *Microelectronics Reliability*, 114, 113899.
- Qin, I., Yauw, O., Schulze, G., Shah, A., Chylak, B., & Wong, N. 2017. Advances in wire bonding technology for 3D die stacking and fan out wafer level package. In *Proceedings of the Electronic Components and Technology Conference*.
- Ramli, M. I. I., Salleh, M. a. a. M., Abdullah, M. M. a. B., Zaimi, N. S. M., Sandu, A. V., Vizureanu, P., Rylski, A., & Amli, S. F. M. 2022. Formation and Growth of intermetallic Compounds in Lead-Free solder Joints: a review. *Materials*, 15(4), 1451. <https://doi.org/10.3390/ma15041451>
- Ren, H., Zhao, S., Mu, J., Wang, W., Han, Z., Li, Z., Li, Q., Wang, J., & Liu, Y. 2024. Research on the Electro-Thermal–Mechanical properties of IGBT modules under different bond wire failure modes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 71(7), 4259–4266.
- Senthil Kumar, B., Sivakumar, M., Malliah, R., Ming, L., Yew, S. K., & James, J. 2010. Process characterization of Cu & Pd coated Cu wire bonding on overhang die: Challenges and solution. In *Proceedings of the Electronic Packaging Technology Conference*.
- Sešek, A., & Makarovič, K. 2022. Metallization, material selection, and bonding of interconnections for novel LTCC and HTCC power modules. *Materials*, 15(3), 1036.
- Shih, M.K., Chen, T.Y., Huang, B.Y., Pan, C.T., Wang, C.C., Hung, C.P. 2025. Thermal Characteristics Analysis and Optimization of Heterogeneous 2.5-D Package Under System-Level Conditions, *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 15(1), 157-164.

- Shin, D., & Lee, J. J. 2012. Theoretical analysis of the deflection of a cantilever plate for wirebonding on overhang applications. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*.
- Shin, D., Kwak, D., Song, Y., Chung, M., Ahn, E. & Cho, K. 2006. Characterization of Wire Bondability on Overhang Structured Chip in Multi Chip Package, *2006 International Conference on Electronic Materials and Packaging*, Hong Kong, China, 2006, 1-6.
- Siddiqui, J., Taheri, M., Alam, A. U., & Deen, M. J. 2021. Nanomaterials in Smart Packaging Applications: A review. *Small*, 18(1), 2101171.
- Stephan, D., Chew, Y. H., Goh, H. M., Pasamanero, E., Theint, E. P. P., Calpito, D. R. M., & Ling, J. 2007. A comparison study of the bondability and reliability performance of Au bonding wires with different dopant levels. In *2007 9th Electronics Packaging Technology Conference* (pp. 737-742). IEEE.
- Sun, J., Seah, J., Leong, V., & Wong, S. 2025. Investigating and Mitigating Gold Wire Stitch Breakage Failures in Tire Pressure Monitoring Sensor. *IEEE*, 1–6.
- Sun, X. T., Chen, W. J., Xiong, X. Y., Chen, W. H., & Jin, Y. 2023b. A variable configuration force sensor with adjustable resolution for robotic applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70, 2066–2075.
- Sun, Y., Ma, K., Song, Y., Zi, T., Liu, X., Feng, Z., Zhou, Y., & Liu, S. 2023. Failure analysis for gold wire bonding of sensor packaging based on experimental and numerical methods. *Micromachines*, 14(9), 1695.
- Supramaniam, S., Bakar, M. A., Atiqah, A., Jalar, A., & Razak, M. Z. A. (2023). Moisture content and early corrosion detection of CU wire bonding in a semiconductor package. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23(6), 2362–2369.
- Tanaka Precious Metals. Copper Bonding Wire With Better Performance than Gold. TANAKA Precious Metals, 25 December 2024. <https://tanaka-preciousmetals.com/en/solution/case/case13/>
- Tanna, S., Pisigan, J. L., Song, W. H., Halmo, C., Persic, J., & Mayer, M. 2012. Low cost Pd coated Ag bonding wire for high quality FAB in air. In *Proceedings of the IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, San Diego, CA, USA.

- Tseng, Y. W., Hung, F. Y., & Lui, T. S. 2015. Microstructure, mechanical and high-temperature electrical properties of cyanide-free Au-coated Ag wire (ACA). *Materials Transactions*, 56, 441–444.
- Veloo, N., Tuazon, A. J. A., & Rosland, A. 2024. Base loop characterization to alleviate short tail issue in stack die package. In *2024 IEEE 40th International Electronics Manufacturing Technology (IEMT)* (pp. 1-4). IEEE.
- Yusoff, W. Y. W., Jalar, A., Othman N.K. and Rahman, I.A. 2014. Effects of thermal cycling on the mechanical properties of gold wire bonding, *2014 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE2014)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014, pp. 521-524.
- Wang, H., Ma, J., Yang, Y., Gong, M., & Wang, Q. 2023. A review of System-in-Package Technologies: Application and Reliability of Advanced Packaging. *Micromachines*, 14(6), 1149.
- Wen, Y., Chen, C., Ye, Y., Xue, Z., Liu, H., Zhou, X., Zhang, Y., Li, D., Xie, X., & Mai, Y. 2022. Advances on thermally Conductive Epoxy-Based Composites as Electronic Packaging Underfill Materials—A review. *Advanced Materials*, 34(52), e2201023.
- Won, D., Bang, J., Choi, S. H., Pyun, K. R., Jeong, S., Lee, Y., & Ko, S. H. 2023. Transparent Electronics for wearable electronics application. *Chemical Reviews*, 123(16), 9982–10078.
- Xiao, Y., Tang, H., Zhang, H., Sun, L., Xie, Y., Wu, B., Xie, W., Cai, X. & Li, F. 2022a. Effect of Au Coating on the Electrolytic Migration of Ag Bonding Wires for Electronic Packaging Applications. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2393 012013
- Xiao, Y., Tang, H., Zhang, H., Yang, X., Sun, L., Xie, Y., Wu, B., Luan, B., Xie, W., & Cai, X. 2022b. Au-coated Ag alloy bonding wires with enhanced oxidation resistance for electronic packaging applications. *Microelectronics International*, 40(2), 96–103.
- Xiao, Y., Tang, H., Zhang, H., Yang, X., Sun, L., Xie, Y., Wu, B., Luan, B., Xie, W., Cai, X. 2023. Au-coated Ag alloy bonding wires with enhanced oxidation resistance for electronic packaging applications". *Microelectronics International*, 40(2), 96–103.

- Xie, M. W., Huang, W., Chen, H. M., Gong, L. K., Xie, W. B., Wang, H., & Yang, B. 2021. Microstructural evolution and strengthening mechanisms in cold-rolled Cu–Ag alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 851, 156893.
- Xu, K., Zhang, W., Luo, J., Yu, H., Yuan, H., Wang, B., & Wu, D. 2024. Evolution mechanism of interfacial multi-layer intermetallic compounds and failure behavior in the Al–Au wire bonding. *Journal of Materials Research and Technology*, 32, 2843–2856.
- Yuan, X., He, Q., Zheng, S., Zhang, J., Yang, D., Bi, Q., Luo, Y., Chen, D., & Wang, X. 2025. The current induced mass transformation of Ag alloy wire bonded led chip. *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 6659–6671.
- Zhang, B., Xu, L., Xiong, K., He, J., Rong, X., Mao, Y., Tang, X. 2023. Controlling diffusion in gold bonding materials for high reliability via microalloying of trace rare earth metals. *Scripta Materialia*, 230, 115395.
- Zhang, Y., Cao, R., Liang, Q., & Zhang, S. 2025. Effect of ultrasonic power on the morphology evolution of wedge bonded interface between Al and Cu wires. *Journal of Physics Conference Series*, 2956(1), 012012.
- Zhang, Y., Wu, K., Li, H., Shen, S., Cao, W., Li, F., Han, J. 2022. Thermal fatigue analysis of gold wire bonding solder joints in MEMS pressure sensors by thermal cycling tests, *Microelectronics Reliability*, 139, 114829.
- Zhao, J., Chen, Z., Qin, F., Yu, D. 2023. Development of high performance 2.5D packaging using glass interposer with through glass vias. *J Mater Sci: Mater Electron* 34, 1790.
- Zhou, H., Zhang, Y., Cao, J., Su, C., Li, C., Chang, A., & An, B. 2023. Research Progress on Bonding Wire for Microelectronic Packaging. *Micromachines*, 14(2), 432.
- Zhou, J., Watanabe, I., Song, W., Kambayashi, K., & Chen, T. 2024. Multi-objective topology optimization of porous microstructure in die-bonding layer of a semiconductor. *Science and Technology of Advanced Materials Methods*, 4(1).
- Zulkifli, M.N., Harun, F., & Jalar, A. 2019. Effect of surface roughness and hardness of leadframe on the bondability of gold wedge bonds. *Microelectronics International*, 36(2), 62–67.

LAMPIRAN A**SENARAI PENERBITAN****JURNAL**

Azahar, A. Z., Bakar, M. A., Jalar, A., et al. (2024). Effect of die deflection during Au wire bonding process on bonding quality in overhang semiconductor package. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 5836–5845. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-09028-4>

PROSIDING

Ahmad Zarif Azahar, Maria Abu Bakar, Azman Jalar. 2024. A Comparative Study of Mechanical Properties in Gold with Different Purity Wire Bonding. *Proceedings of the Green Materials and Electronic Packaging Interconnect Technology Symposium EPITS 2024, 26-27 August, Ho Chi Minh City, Vietnam*. ms 3-9.