

PENGARUH IMPLANTASI ION ARGON TERHADAP SIFAT-SIFAT MEKANIK PADA PERMUKAAN BAHAN ALUMINIUM

Sudjatmoko, Sri Sulamdari, Sutadji Sugiarto
Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PENGARUH IMPLANTASI ION ARGON TERHADAP SIFAT-SIFAT MEKANIK PADA PERMUKAAN BAHAN ALUMINIUM. Telah dilakukan implantasi ion argon ke dalam permukaan bahan Al (aluminium) dengan tujuan untuk mendapatkan sifat mekanik baru yang lebih baik dengan meningkatkan kekerasan dan memperbaiki ketahanan terhadap keausan dari permukaan bahan. Teknik implantasi ion digunakan untuk mengimplantasikan ion-ion argon ke dalam permukaan Al pada energi ion 40 keV untuk berbagai variasi dosis ion dari $4,46 \times 10^{16}$ sampai dengan $1,25 \times 10^{17}$ ion/cm². Uji kekerasan-mikro dilakukan dengan peralatan Vickers-microhardness, dan uji ketahanan terhadap keausan dilaksanakan dengan mengukur kedalaman jejak yang terjadi pada permukaan cuplikan terhadap variasi beban dari 25 gram sampai dengan 500 gram. Berdasarkan penelitian diperoleh bahwa tingkat kekerasan dan ketahanan terhadap keausan dari permukaan cuplikan mencapai suatu nilai maksimum pada dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm², nilai kekerasan maksimum $39,58 \pm 2,05$ g/mm². Uji keausan dari cuplikan yang diimplantasi dengan dosis ion $9,82 \times 10^{16}$ sampai dengan $1,16 \times 10^{17}$ ion/cm² diperoleh bahwa keausan permukaan cuplikan meningkat dengan penambahan beban dan keausan terkecil terjadi pada cuplikan yang terimplantasi dengan dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm².

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF ARGON ION IMPLANTATION OVER THE MECHANICAL PROPERTIES ON THE ALUMINIUM SURFACE. It has been done the argon ion implantation into the surface of Al (aluminium) material with purpose to get a good quality of new mechanical properties by increasing the hardness and improving the wear resistance of material surface. It is used the ion implantation technique to implant the argon ions into the Al surface with an ion energy of 40 keV for variation of ion dose from 4.46×10^{16} up to 1.25×10^{17} ion/cm². The microhardness test is done by the Vickers- microhardness tester, and the wear resistance test is completed by measuring of the track penetration which occur on the surface of sample over load variation, from 25 g up to 500 g. Based on the investigation is obtained that the hardness and the wear resistance of the sample surface reach a maximum value on the ion dose of 1.07×10^{17} ion/cm², the maximum hardness value is 39.58 ± 2.05 g/mm². The wear test of sample implanted with the ion dose of 9.82×10^{16} up to 1.16×10^{17} ion/cm² is obtained that the wear of sample surface is increase for an addition of load, and the smallest wear occur on the sample implanted by ion dose of 1.07×10^{17} ion/cm².

PENDAHULUAN

Dalam teknologi semikonduktor, teknik implantasi ion telah dirintis penggunaannya sejak tahun 1960-an untuk mencangkakkan atom-atom takmurnian ke dalam bahan semikonduktor Si atau Ge agar diperoleh suatu bahan yang aktif kelistrikkannya. Teknik ini semakin berkembang, dan secara luas telah diaplikasikan dalam industri mikroelektronika pada tahun 1970-an. Di negara-negara maju pada tahun-tahun terakhir ini, akselerator implantasi ion telah dikembangkan untuk dapat menghasilkan arus berkas ion yang cukup

tinggi sehingga penggunaan teknik implantasi ion tidak hanya terbatas pada bidang semikonduktor, akan tetapi juga telah diaplikasikan untuk mengubah dan memperbaiki sifat-sifat kimia, mekanik dan optik dari suatu zat padat sehingga diperoleh bahan baru dengan sifat-sifat yang lebih unggul (1,2).

Implantasi ion adalah suatu proses yang dapat mengubah dan memperbaiki sifat-sifat permukaan suatu bahan dengan cara menambahkan atom-atom dopan, dengan cara mengarahkan ion-ion dopan berkecepatan tinggi yang dihasilkan oleh akselerator ke arah

bahan tersebut. Dengan teknik implantasi ion dapat dilakukan kontrol yang akurat terhadap jumlah ion dopan, kedalaman penetrasi ion dopan pada permukaan bahan, dan mudah diproduksi kembali untuk setiap cuplikan. Selain itu, dengan teknik ini proses doping dapat berlangsung dengan cepat dan homogen, tidak menggunakan suhu tinggi, dan hanya memerlukan kemurnian dopan yang rendah karena ion-ion dopan dipisahkan sesuai dengan massanya oleh sebuah sistem pemisah massa (medan magnet) sebelum diimplantasikan (1,2).

Dalam teknologi semikonduktor dosis ion dopan yang diperlukan adalah 10^{11} sampai dengan 10^{16} ion/cm², akan tetapi untuk doping pada bahan metal (non-semikonduktor) diperlukan dosis ion 10^{17} sampai dengan 10^{18} ion/cm². Dalam makalah ini disajikan hasil penelitian pengaruh implantasi ion argon terhadap sifat-sifat mekanik pada permukaan bahan Al (aluminium). Sifat-sifat mekanik di sini adalah tingkat kekerasan dan ketahanan terhadap keausan dari permukaan Al setelah diimplantasi dengan ion argon. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan implantasi ion dopan argon pada permukaan bahan Al untuk mendapatkan sifat mekanik baru yang lebih unggul, yaitu mempunyai sifat lebih keras dan tahan terhadap keausan. Metode yang digunakan adalah teknik implantasi ion, yaitu mencangkokkan ion-ion dopan argon ke dalam permukaan Al pada energi 40 keV dengan berbagai variasi dosis ion dopan dari $4,46 \times 10^{16}$ sampai dengan $1,25 \times 10^{17}$ ion/cm². Pengukuran tingkat kekerasan cuplikan hasil implantasi dilakukan dengan menggunakan peralatan Vickers - microhardness, dan pengukuran keausan dilakukan dengan mengukur kedalaman jejak yang terjadi pada permukaan cuplikan pada berbagai beban dari 25 gram sampai dengan 500 gram.

Teknik implantasi ion

Akselerator implantasi ion adalah salah satu jenis akselerator energi rendah, yang dapat mempercepat partikel bermuatan positif hingga memperoleh energi sampai beberapa ratus keV. Pada umumnya akselerator implantasi ion terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sumber ion, generator tegangan tinggi, tabung akselerator, sistem vakum, sistem pemayar (scanning) dan ruang target (sasaran); serta komponen tambahan berupa lensa kuadropol dan sistem pemisah massa (medan magnet).

Di negara-negara maju teknik implantasi ion telah dikembangkan aplikasinya pada

tahun-tahun terakhir ini untuk perlakuan permukaan bahan (surface treatment) agar diperoleh bahan-bahan baru dengan sifat lebih unggul. Suatu kenaikan tingkat kekerasan dari baja telah diamati setelah diimplantasi dengan ion-ion dopan nitrogen, argon, boron dan karbon (3). Demikian pula untuk implantasi ion dopan nitrogen dengan dosis 2×10^{17} ion/cm² dan energi 110 keV pada alat pemotong (gunting) diperoleh bahwa ketahanan terhadap keausan, dan umur pemakaiannya dapat ditingkatkan sampai dua kali lipat (4). Selain ion-ion dopan tersebut di atas, ion-ion dopan Ti+C yang diimplantasikan pada bahan 440C stainless-steel dapat meningkatkan ketahanannya terhadap keausan, dan ion dopan Cr yang diimplantasikan pada baja M-50 dapat memperbaiki ketahanannya terhadap korosi (5).

Jangkauan ion dalam padatan

Dalam implantasi ion, proses perlambatan dari ion dalam cuplikan padat (target) dapat dibagi dalam dua mekanisme yang dominan, yaitu kehilangan energi elektronik yang melibatkan interaksi antara ion yang datang dengan elektron-elektron target; dan kehilangan energi inti yang melibatkan interaksi antara ion-ion yang datang dengan inti target [1,6]. Secara umum untuk menyajikan perlambatan dari ion-ion dalam target adalah melalui daya henti (dE/dx), yang didefinisikan sebagai energi ion dE yang hilang saat melintasi jarak dx . Daya henti tersebut secara matematis dapat dituliskan dengan persamaan (1,6).

$$\frac{dE}{dx} = N \int T d\sigma \quad (1)$$

Dengan: $d\sigma$ = tampang lintang tumbukan, T = energi ion yang hilang dalam tumbukan, N = rapat pusat hamburan dari target.

Tampang lintang daya henti, yaitu kebolehan-jadian ion yang datang mengalami interaksi dengan atom target dan kehilangan energi dE saat melintasi jarak dx diberikan oleh persamaan:

$$e = \frac{1}{N} \frac{dE}{dx} = \int T d\sigma \quad (2)$$

Daya henti total yaitu daya henti yang diakibatkan oleh proses elektronik dan inti, berdasarkan persamaan (1) dan (2) dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$\frac{dE}{dx} = \left[\frac{dE}{dx} \right]_e + \left[\frac{dE}{dx} \right]_n = N(e_e + e_n) \quad (3)$$

dengan: ϵ_e = tampang lintang daya henti elektronik; ϵ_n = tampang lintang daya henti inti. Dari energi ion yang hilang, jangkau ion dapat dihitung menurut persamaan (1,6):

$$R = \int \frac{dE}{dE/dx} \quad (4)$$

di mana batas integrasi adalah dari energi ion mula-mula sampai bernilai nol. Pada energi ion penembak yang rendah, daya henti inti lebih dominan disebabkan karena $1/E^2$ bergantung pada tampang lintang Rutherford, sedangkan pada energi tinggi daya henti elektronik lebih dominan.

Proses perlambatan dari ion-ion yang bergerak di dalam padatan adalah proses statistik. Maka lokasi di mana ion-ion yang terimplantasi berhenti juga statistik, dan harus dinyatakan dengan variabel-variabel statistik. Jangkau ion R berkaitan dengan panjang jejak rata-rata dari ion-ion sebelum berhenti, sementara jangkau terproyeksi R_p memberikan kedalaman penetrasi rata-rata dari ion relatif terhadap permukaan target. Distribusi jangkau dari ion-ion yang terimplantasi diperoleh dari jangkau rata-rata R_p , deviasi standar σ_p , dan dengan pendekatan Gaussian dapat diperoleh konsentrasi ion dopan yang terimplantasi (1,6) :

$$N(x) = \frac{\Phi}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2 \sigma_p^2} \right] \quad (5)$$

dengan : x = diukur sepanjang arah berkas ion
 Φ = fluensi atau dosis ion dopan
 σ_p = deviasi standar dalam jangkau terproyeksi R_p .

Pendekatan Gaussian dari persamaan (5) sangat bermanfaat untuk mendapatkan gambaran fisis dari profil konsentrasi dan profil kedalaman ion dopan yang terimplantasi. Perlu dicatat bahwa profil yang diberikan oleh persamaan (5) di atas mengabaikan difusi yang mungkin terjadi selama implantasi dan efek-efek orde tinggi seperti efek pengkanalan (1,6). Besarnya dosis ion dopan yang diimplantasikan ke permukaan bahan (7).

$$\Phi = \int_0^T \frac{I dt}{e A} \quad (6)$$

dengan : I = arus berkas ion dopan yang diimplantasikan; t = lamanya proses implantasi ;
 e = muatan ion; A = luasan permukaan target. Apabila dalam proses implantasi besarnya arus ion dopan dibuat tetap, maka variasi dosis

ion dopan dapat divariasikan dengan mengubah waktu implantasi untuk e dan A konstan.

Tingkat kekerasan cuplikan hasil implantasi

Perubahan sifat-sifat mekanik suatu permukaan bahan akibat implantasi ion merupakan masalah yang penting dan sangat menarik untuk diteliti. Beberapa peneliti di negara-negara maju telah melakukan penelitian tingkat kekerasan bahan hasil implantasi, dan dari hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa tingkat kekerasan dari suatu bahan meningkat setelah diimplantasi dengan ion-ion tertentu. Sampai saat ini belum ada teori yang menjelaskan dengan pasti terjadinya peningkatan kekerasan suatu permukaan bahan akibat implantasi ion dopan, tetapi diduga bahwa naiknya tingkat kekerasan tersebut mungkin disebabkan oleh pemampatan permukaan karena adanya turah atom, dan karena kerusakan radiasi (radiation damage) yang diakibatkan penembakan berkas ion ke dalam permukaan target (8).

Pada umumnya kekerasan suatu bahan menyatakan ketahanan terhadap deformasi, sedangkan untuk logam sifat tersebut merupakan ukuran ketahanannya terhadap deformasi plastis atau deformasi permanen. Kekerasan juga dapat diartikan sebagai ukuran ketahanan terhadap lekukan. Tingkat kekerasan suatu bahan berbanding terbalik dengan keausannya, ini berarti bahwa jika suatu bahan mempunyai tingkat kekerasan tinggi maka mempunyai keausan kecil. Dengan demikian hubungan antara keausan bahan dengan tingkat kekerasannya dapat dituliskan (7):

$$K = a \frac{1}{P} \quad (7)$$

di mana K adalah keausan bahan, dan P adalah tingkat kekerasan bahan.

TATAKERJA

Penyiapan cuplikan

Bahan cuplikan adalah aluminium plat dengan ketebalan 2,6 mm yang dipotong-potong dengan ukuran 4 cm x 1 cm. Sebelum dilakukan implantasi ion-ion argon pada permukaan Al, seluruh permukaan cuplikan dibersihkan dari lapisan kotoran dan lemak dengan menggunakan deterjen. Setelah itu dicuci dengan pembersih ultrasonik (ultrasonic cleaning), kemudian dilanjutkan dengan pembersihan menggunakan alkohol dan dikeringkan. Perlakuan cuplik-

an berikutnya adalah penghalusan permukaan cuplikan sehingga diperoleh permukaan cuplikan Al yang sangat rata, halus dan mengkilap.

Implantasi ion argon

Mesin implantasi ion yang digunakan adalah hasil buatan sendiri, yang mampu menghasilkan energi ion maksimum 150 keV dan arus berkas ion dopan sebesar 2 mA.

Langkah-langkah yang dilakukan untuk proses implantasi dengan akselerator implantasi ion adalah sebagai berikut.

1. Menghampakan seluruh sistem sehingga mencapai kehampaan orde 10^{-6} mbar dengan menggunakan pompa rotari dan pompa turbomolekul.
2. Menghidupkan generator tegangan tinggi Cockcroft-Walton sampai dengan 40 kV, untuk mempercepat ion-ion dopan argon sehingga akan memperoleh energi sebesar 40 keV.
3. Menghidupkan sistem sumber ion tipe Penning, dan mengalirkan gas argon ke dalam sistem sumber ion. Oleh medan listrik yang terpasang antara katoda dan anoda sumber ion serta medan magnet, maka gas argon terionisasi sehingga terbentuk ion-ion argon. Ion-ion argon tersebut oleh tegangan ekstraktor yang terpasang pada sistem sumber ion ditarik keluar dari sistem, yang selanjutnya dipercepat di dalam tabung akselerator dan disapukan ke permukaan target.
4. Dalam eksperimen ini tegangan pemercepat dibuat konstan sebesar 40 kV, dan arus berkas ion dopan divariasi mulai 50 μ A sampai dengan 140 μ A dengan interval 5 μ A selama 30 menit untuk setiap cuplikan. Karena implantasi ion merupakan gejala yang bersifat statistik, maka pada setiap nilai arus berkas ion dopan tertentu dilakukan implantasi pada 7 (tujuh) buah cuplikan.

Karakterisasi cuplikan hasil implantasi

Tingkat kekerasan cuplikan hasil implantasi diuji dengan menggunakan peralatan Vickers-microhardness. Berdasarkan metoda pengujian kekerasan, maka ada tiga jenis ukuran kekerasan, yaitu kekerasan goresan (scratch hardness), kekerasan lekukan (indentation hardness), dan kekerasan pantulan (rebound hardness). Pada penelitian ini uji kekerasan dilakukan dengan metode kekerasan lekukan menggunakan Vickers-microhardness. Untuk setiap cuplikan diamati tingkat kekerasannya pada

lima tempat yang berbeda, yang kemudian hasilnya diambil nilai rata-ratanya.

Tingkat keausan permukaan cuplikan Al hasil implantasi dilakukan dengan mengukur kedalaman jejak yang terjadi akibat goresan benda tajam yang diberi beban di atasnya. Beban yang diberikan divariasi mulai dari 25 gram sampai dengan 500 gram, dan kedalaman jejak diamati dengan sebuah mikroskop. Pengujian keausan terhadap variasi beban ini dilakukan pada cuplikan yang diimplantasi dengan dosis ion dopan sebesar $9,82 \times 10^{16}$; $1,03 \times 10^{17}$; $1,07 \times 10^{17}$ dan $1,16 \times 10^{17}$ ion/cm².

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji tingkat kekerasan

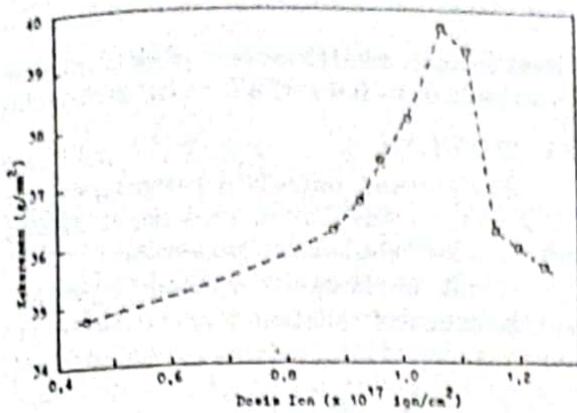
Dalam teknik implantasi ion yang digunakan untuk mengubah dan memperbaiki sifat-sifat mekanik permukaan bahan Al, dosis ion dopan yang diimplantasikan divariasi dengan cara memvariasi besarnya arus berkas ion

Tabel 1. Nilai dosis ion dopan yang terimplantasi pada permukaan cuplikan Al untuk berbagai variasi besarnya arus berkas ion dopan argon

No.	Arus Ion (μ A)	Dosis Ion (ion/cm ²)
1	50	$4,46 \times 10^{16}$
2	100	$8,93 \times 10^{16}$
3	105	$9,37 \times 10^{16}$
4	110	$9,82 \times 10^{16}$
5	115	$1,03 \times 10^{17}$
6	120	$1,07 \times 10^{17}$
7	125	$1,12 \times 10^{17}$
8	130	$1,16 \times 10^{17}$
9	135	$1,20 \times 10^{17}$
10	140	$1,25 \times 10^{17}$

dopan dengan waktu implantasi tetap yaitu selama 30 menit. Untuk mengetahui besarnya dosis ion dopan yang terimplantasi pada permukaan cuplikan Al ditentukan dengan menggunakan persamaan (6), dimana $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C dan luasan tempat cuplikan $A = 12,6$ cm². Hasil perhitungan besarnya dosis ion dopan sebagai fungsi arus berkas ion dopan tercantum di dalam Tabel 1.

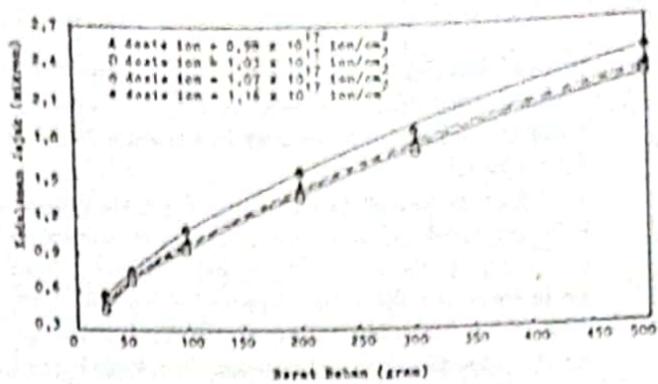
Pengukuran tingkat kekerasan permukaan Al hasil implantasi ion argon untuk berbagai nilai dosis ion dopan yang diimplantasikan diukur dengan peralatan Vickers-microhardness, dan hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam gambar tersebut ditunjukkan



Gambar 1. Grafik hubungan antara tingkat kekerasan permukaan cuplikan Al terhadap dosis ion argon yang diimplantasikan

hubungan antara dosis ion argon yang diimplantasikan dengan tingkat kekerasan permukaan cuplikan. Sebelum diimplantasi tingkat kekerasan permukaan cuplikan Al, VHN = $34,04 \pm 0,67$ g/mm², dan kemudian mencapai nilai maksimum pada dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm² dengan tingkat kekerasan $39,58 \pm 2,05$ g/mm². Sedangkan untuk dosis ion berikutnya yang semakin besar, tingkat kekerasan dari permukaan cuplikan Al menurun, dan pada dosis ion $1,25 \times 10^{17}$ ion/cm² tingkat kekerasan yang dicapai $35,72 \pm 1,42$ g/mm². Dengan demikian implantasi ion dopan argon pada permukaan bahan Al dapat meningkatkan kekerasan sampai dengan 16,3% pada dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm².

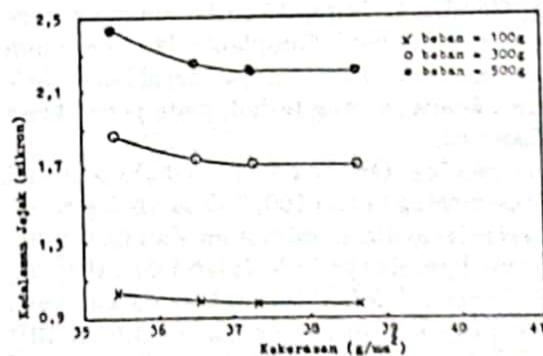
Berdasarkan persamaan (5), konsentrasi ion dopan (ion/cm³) yang telah terimplantasi dalam permukaan cuplikan Al ditentukan oleh besarnya dosis ion yang diimplantasikan, jangkauan ion terproyeksi R_p dan deviasi standarnya pada suatu kedalaman tertentu atau besarnya energi ion. Nilai R_p ditentukan oleh jenis ion dopan dan jenis target pada energi ion tertentu. Selama implantasi berlangsung akan terjadi pergeseran kisi-kisi atom target pada suatu letak interstisial, dan dihasilkan atom-atom interstisial. Oleh karena itu kekerasan dari permukaan cuplikan Al mempunyai nilai maksimum, dimana ion-ion argon telah menempati lowong yang terjadi. Selain itu, kekerasan yang terjadi mungkin disebabkan karena timbulnya kerusakan radiasi yang diakibatkan oleh penembakan ion-ion argon selama proses implantasi. Untuk dosis ion yang lebih besar tingkat kekerasannya dapat berkurang karena adanya cacat (defect) yang diakibatkan oleh kelebihan radiasi ion dan mungkin oleh adanya



Gambar 2. Grafik hubungan antara kedalaman jejak atau keausan permukaan cuplikan Al untuk berbagai variasi berat beban, untuk implantasi ion argon dengan energi 40 keV

efek anil dari Al yang diakibatkan oleh pemanasan dari radiasi ion.

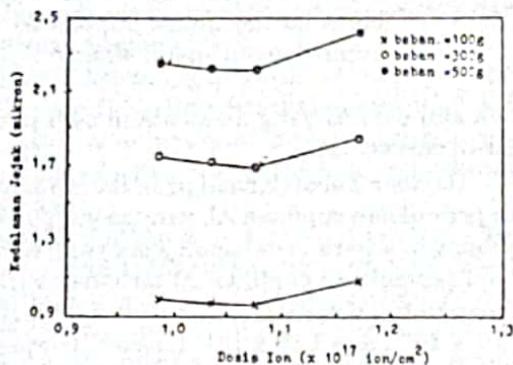
Gambar 2 adalah hasil pengukuran keausan permukaan cuplikan Al, yang menunjukkan hubungan antara kedalaman jejak yang terjadi pada permukaan cuplikan Al terhadap variasi beban untuk dosis ion $9,82 \times 10^{16}$, $1,03 \times 10^{17}$, $1,07 \times 10^{17}$, dan $1,16 \times 10^{17}$ ion/cm². Berdasarkan pengujian ketahanan terhadap keausan tersebut diperoleh bahwa jejak kedalaman pada permukaan cuplikan Al menjadi semakin dalam dengan bertambahnya beban. Berdasarkan Gambar 2 tersebut, ketahanan terhadap keausan yang terbaik adalah cuplikan Al yang diimplantasi dengan dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm². Dari persamaan (7) terlihat bahwa keausan bahan semakin kecil dengan semakin besarnya nilai kekerasannya. Dengan demikian dapat diketahui dari Gambar 2 tersebut bahwa keausan terkecil terjadi pada cuplikan Al yang mem-



Gambar 3. Grafik hubungan antara jejak kedalaman atau keausan permukaan cuplikan Al terhadap nilai kekerasannya untuk beban 100, 300 dan 500 g

punyai nilai kekerasan optimum, dimana dosis ion yang diimplantasikan $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm² yang menghasilkan tingkat kekerasan $39,58 \pm 2,05$ g/mm².

Dalam penelitian ini juga diamati pengaruh tingkat kekerasan permukaan cuplikan Al terhadap kedalaman jejak atau keausannya pada variasi beban, yaitu pada beban 100, 300, dan 500 g. Gambar 3 memperlihatkan hubungan antara tingkat kekerasan dan kedalaman jejak. Dari gambar tersebut dapat ditunjukkan bahwa pada nilai beban tertentu, kedalaman jejak atau keausannya berkurang apabila keke-



Gambar 4. Grafik hubungan antara kedalaman jejak atau keausan terhadap variasi dosis ion dopan pada energi 40 keV untuk beban 100, 300 dan 500g

rasannya meningkat. Demikian juga terhadap variasi nilai beban, untuk beban yang nilainya semakin besar diperoleh kedalaman jejak atau keausan yang semakin besar; dari Gambar 3 diperoleh bahwa untuk beban 500 g terjadi keausan yang lebih besar jika dibandingkan dengan keausan yang terjadi pada beban 100 g. Pada Gambar 4 ditunjukkan hubungan antara dosis ion dopan yang diimplantasikan ke dalam permukaan cuplikan Al pada energi ion 40 keV dengan keausan yang terjadi pada permukaan cuplikan Al.

Dari gambar tersebut terlihat bahwa untuk masing-masing beban 100, 300 dan 500 g mempunyai nilai keausan minimum, dan nilai minimum ini diperoleh pada dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm². Seperti telah ditunjukkan dalam hasil sebelumnya bahwa pada dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm² diperoleh tingkat kekerasan permukaan cuplikan Al yang maksimum. Dengan demikian diperoleh hasil yang konsisten dimana tingkat kekerasan permukaan cuplikan Al maksimum diperoleh pada dosis ion dopan yang

sama dengan nilai keausan yang minimum, yaitu pada dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm².

KESIMPULAN

Berdasarkan data-data pengukuran dan hasil analisis tersebut di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

Teknik implantasi ion selain digunakan untuk mengubah sifat-sifat kelistrikan suatu bahan semikonduktor dalam pembuatan piranti elektronika, teknik ini dapat juga digunakan untuk mengubah sifat-sifat mekanik suatu permukaan bahan non-semikonduktor (metal) pada dosis ion dopan yang tinggi. Untuk jenis ion dopan argon yang diimplantasikan ke dalam permukaan cuplikan Al, tingkat kekerasan maksimum dicapai pada dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm² dan keausan minimum diperoleh pada dosis ion yang sama.

Tingkat kekerasan cuplikan Al hasil implantasi ion mencapai nilai maksimum sebesar $39,58 \pm 2,05$ g/mm² pada dosis ion sebesar $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm², yang berarti naik sekitar 16,3% terhadap cuplikan Al yang tidak diimplantasi. Untuk penambahan dosis ion dopan yang lebih tinggi lagi terjadi penurunan tingkat kekerasannya karena terjadi cacat yang diakibatkan oleh kelebihan radiasi ion, dan karena efek anil dari Al yang menyebabkan pelunakan, hal ini disebabkan oleh pemanasan akibat radiasi ion.

Teknik implantasi ion selain dapat meningkatkan kekerasan permukaan cuplikan Al, juga dapat memperbaiki ketahanannya terhadap keausan. Ketahanan terhadap keausan mencapai nilai minimum pada dosis ion $1,07 \times 10^{17}$ ion/cm², di mana pada dosis ion tersebut dihasilkan tingkat kekerasan yang maksimum. Dengan demikian sesuai dengan teoritis bahwa ketahanan terhadap keausan suatu bahan berbanding terbalik dengan nilai kekerasannya. Hasil-hasil penelitian yang telah diperoleh tersebut mungkin belum optimal, artinya bahwa prosentase peningkatan kekerasan permukaan bahan masih bisa dinaikkan lagi dengan memvariasi besarnya energi ion yang diimplantasikan, dan melakukan variasi suhu cuplikan selama implantasi berlangsung, pada dosis ion dopan sekitar 10^{17} ion/cm².

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih setulus-tulusnya kepada Sdr. Sunarto dan Sdr. Murtidjan yang telah banyak membantu terlaksananya penelitian ini. Semo-

ga budi baik Saudara sekalian mendapatkan
balasan dari Allah SWT. Amien.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ryssel, H., and Ruge, I., Ion Implantation, John Wiley & Sons, Chichester (1986).
2. Dearnaley, G., Ion Implantation Part II : Ion Implantation in Non-Electronic Materials, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B24/25 (1987), 506-511.
3. Pavlov, A.V., et al, Proc. All Soviet Meeting on Ion Beam Physics, Kiev (1974).
4. Xie Zhong-Yin, et al, Ion Implantation for Improving Wear Resistance of Metals, Ion Implantation into Metals, Proc. of the 3rd International Conference on Modification of Surface Properties of Metals by Ion Implantation, Manchester, UK (1981) 117-126.
5. Shioshansi, P., Surface Modification of Industrial Components by Ion Implantation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B37/38 (1989) 667-671.
6. Dresselhaus, M.S., and Kalish, R., Ion Implantation in Diamond, Graphite and Related Materials, Springer Verlag, New York (1992).
7. Iwaki, M., Ion Implantation Science and Technology, JSPS-KEK International Spring School, Fuji Study and Training Institute (March 23 1994).
8. Takano, I., et al, Effect of N_2^+ Ion Dose on the Hardness and Other Properties of AlN Thin Films Prepared by the Dynamic Mixing Method, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B37/38 (1989) 688-691.