

Pengembangan Pengukuran *Sheet Resistance* Film Tipis Menggunakan Metode *Four Point Probe*

Darmawan Hidayat¹, Rochmat Zulianto², Bambang Mukti Wibawa³, Bernard Y. Tumbelaka⁴

Departemen Teknik Elektro, FMIPA, Universitas Padjadjaran

Jl. Raya Bandung-Sumedang km. 21, Jatinangor, 45363, Telp/Fax: 022-7797712/0227794545

e-mail: ¹darmawan.hidayat@unpad.ac.id

Abstrak – Alat ukur resistansi lembaran (*sheet resistance*) dengan metode *four point prob* (FPP) adalah salah satu jenis alat yang biasa digunakan untuk mengukur nilai resistansi suatu lapisan bahan semikonduktor (*silicon, germanium, galium arsenede dan lain-lain*) dan bahan logam. Cara kerja alat ukur *sheet resistance* menggunakan metode *four point prob* adalah dengan memberikan arus pada prob terluar dan mengukur tegangan pada dua prob terdalam. Makalah ini melaporkan pengembangan alat ukur *sheet resistance* dengan metode *four point prob* yang dapat digunakan untuk pengukuran lima kali pengulangan dengan keluaran arus konstan yang dapat diatur (maksimal 3,3 mA) dan hasil pengukuran dapat ditampilkan pada LCD. Hasil validasi yang dilakukan dengan mengukur nilai *sheet resistance* film indium tin oxide (ITO) standar yang sudah diketahui nilainya diperoleh bahwa nilai standar 8-12 Ω/sq terbaca 12 Ω/sq dan nilai standar 5 Ω/sq terbaca 7 Ω/sq .

Kata kunci: hambatan lembaran, *four point prob*, sumber arus konstan, mikrokontroler

1. Pendahuluan

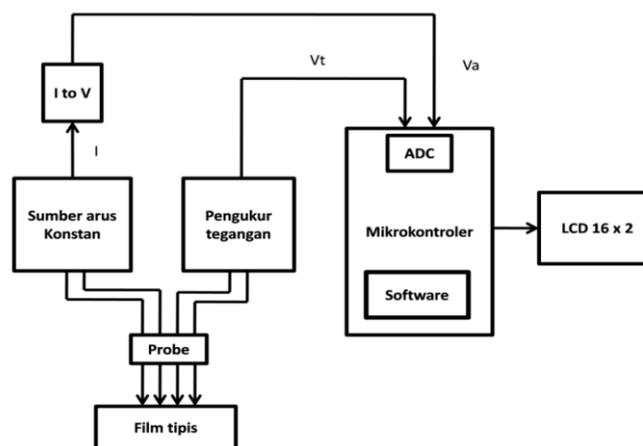
Film tipis merupakan komponen kunci dari produk mikroelektronik modern dan fotonik^[1]. Salah satu karakteristik listrik penting yang dimiliki film tipis adalah nilai resistansi lembaran (*sheet resistance*). Nilai resistansi lembaran film tipis dipengaruhi oleh nilai arus yang mengalir di permukaan dan ketebalan film tipis. Alat ukur nilai *sheet resistance* didasari dengan menggunakan berbagai metode pengukuran seperti metode *four-point prob* (FPP), *two point prob* (TPP), van der Pauw dan Hall effect. FPP dan TPP merupakan metode yang paling sering dan mudah untuk digunakan karena metode tersebut berhubungan langsung dengan besaran fisis listrik (tegangan dan kuat arus). Makalah ini melaporkan metode FPP karena lebih akurat dibandingkan dengan metode TPP^[2] karena metode FPP menggunakan empat buah prob untuk mengukur kuat arus dan tegangan (dua prob untuk arus dan dua prob untuk tegangan), sedangkan metode TPP hanya menggunakan dua buah prob (prob dipakai bersamaan untuk mengukur kuat arus dan tegangan). Pada metode TPP, tegangan diukur menggunakan prob yang pada saat bersamaan digunakan untuk mengukur kuat arus^[3-6]. Padahal sesuai dengan karakteristik ideal voltmeter saat pengukuran tegangan, prob tegangan tidak dapat dilewati oleh arus (hambatan yang dalam sangat besar)^[4]. Sehingga pengukuran kuat arus dan tegangan pada film tipis menjadi kurang akurat. Selain kombinasi prob, pengukuran nilai resistansi lembaran juga dipengaruhi oleh perbandingan antara ketebalan film tipis dengan jarak antar prob. Kombinasi prob dan perbandingan antara ketebalan film tipis dengan jarak antar prob termasuk ke dalam faktor koreksi. Faktor koreksi yang ideal harus bernilai satu agar pengukuran resistansi lembaran hanya dipengaruhi oleh nilai tegangan dan kuat arus^[7].

Alat ukur resistansi lembaran komersial tersedia di pasaran, namun ada terbatas pada fitur satu kali pengukuran. Dalam praktek pengukuran resistansi lembaran pengukuran berulang sangat diperlukan untuk memperoleh nilai resistansi lembaran pada sampel yang sangat banyak. Beberapa alat ukur resistansi lembaran dengan metode FPP komersial untuk kategori peralatan

saintifik harganya relatif tinggi. Oleh karena itu, makalah ini melaporkan pengembangan alat ukur resistansi lembaran dengan menambahkan beberapa fitur seperti perekaman dan pengukuran berulang, dapat dibuat alat dengan tingkat akurasi yang komparatif dan biaya yang murah.

2. Metode

Secara umum sistem pengukuran resistansi lembaran diperlihatkan pada **Gambar 1**. Sistem dibangun atas dua komponen utama yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras terdiri dari rangkaian sumber arus konstan, rangkaian pengontrol terprogram (mikrokontroler), rangkaian pengubah arus ke tegangan, rangkaian peraga LCD (*liquid crystal display*) dan sistem prob (*prob*). Perangkat keras berfungsi sebagai masukan dan pengukur tegangan dan kuat arus yang ditampilkan pada peraga LCD. Pengontrol elektronik dibangun dari mikrokontroler ATMEGA 8535 yang diprogram menggunakan Bahasa C untuk melakukan perhitungan nilai resistansi lembaran dan perhitungan pengukuran berulang.



Gambar 1 Blok diagram sistem pengukuran resistansi lembaran

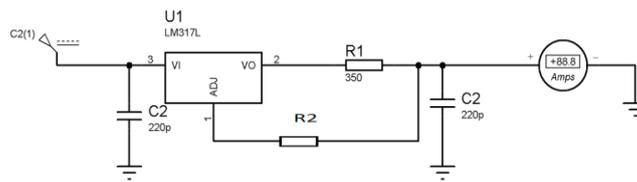
Berdasarkan **Gambar 1**, sumber arus konstan (dengan nilai maksimum 3,3 mA) berfungsi sebagai sumber arus konstan meskipun resistansi lembaran bervariasi. Prob berfungsi sebagai kontak antara film dengan rangkaian pengubah arus-ke-tegangan dimana rangkaian ini berfungsi untuk mengubah nilai kuat arus menjadi tegangan yang akan dimasukkan ke mikrokontroler. Sistem pengukuran kuat arus dan tegangan dilakukan oleh mikrokontroler ATMEGA8535 yang selanjutnya nilai tersebut ditampilkan pada LCD. Film tipis yang digunakan sebagai validasi alat ukur *sheet resistance* adalah film tipis Indium Tin Oxide (ITO LOT11MKBJ9213V) buatan Sigma Aldrich dengan nilai *sheet resistance* 8-12 Ω/sq dan CEC005S, ITO-coating ($\leq 5 \Omega/\text{sq}$) dari Praezisions Glas & Optik GmbH Germany.

3.1 Sumber Arus Konstan

Sumber arus konstan dibangun dari IC LM 317 dan dirancang untuk mengeluarkan arus konstan hingga sebesar 3,3 mA. Rangkaian sumber arus konstan dimuat dalam **Gambar 2**. Besarnya arus keluaran, I dapat diperoleh menggunakan **Persamaan 1**.

$$I = \frac{V_{ref} - V_{adj}}{R} \quad (1)$$

Berdasarkan data sheet LM317 diketahui bahwa besarnya V_{ref} adalah 1,5 V. Sehingga untuk menghasilkan arus *output* sebesar 3,3 mA diperlukan hambatan *adjust* (R) sebesar 350 Ω dan V_{adj} sebesar 0,3 V.



Gambar 2. Rangkaian sumber arus konstan

Arus yang keluar dari sumber arus konstan seperti pada Gambar 2 merupakan arus konstan yang akan dialirkan pada film tipis^[8].

3.2 Rangkaian Akusisi Data (Voltmeter dan Amperemeter)

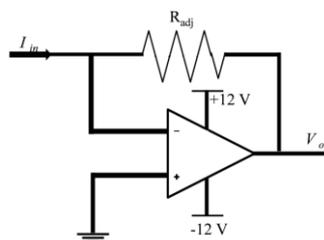
Rangkaian kontroler akusisi data terdiri dari mikrokontroler ATmega8535 dengan memanfaatkan ADC internal. Mikrokontroler ATmega8535 dipilih karena memiliki spesifikasi yang cukup memadai dalam perancangan, salah satu spesifikasi yang memenuhi standar rancangan adalah memiliki jumlah ADC internal sebanyak 10 bit. Rangkaian mikrokontroler dapat mengukur tegangan dengan interval terkecil sebesar 4,88 mV. Tegangan analog yang nantinya terukur akan diubah menjadi bit digital oleh ADC internal ATmega8535. Pin ADC.0 digunakan sebagai masukan untuk pengukuran tegangan, sedangkan pin ADC.1 digunakan sebagai pembaca arus.

Variabel *B* adalah desimal. Karena ADC yang digunakan berjumlah 10 bit, maka nilai tegangan konversi dihitung dengan Persamaan 2, kemudian ditampilkan pada LCD.

$$V_{baca} = \frac{B}{1023} \times V_{ref} \tag{2}$$

3.3 Pengubah Arus-ke-Tegangan

Karena besaran fisis yang dapat dibaca oleh mikrokontroler ATmega8535 adalah tegangan, untuk pembacaan arus diperlukan rangkaian pengubah arus ke tegangan. Gambar rangkaian pengubah arus ke tegangan ditunjukkan oleh Gambar 3, terdiri dari sebuah penguat 741 dan sebuah resistor pengumpan balik. Rangkaian pengubah arus ke tegangan berfungsi sebagai sensor arus injeksi.



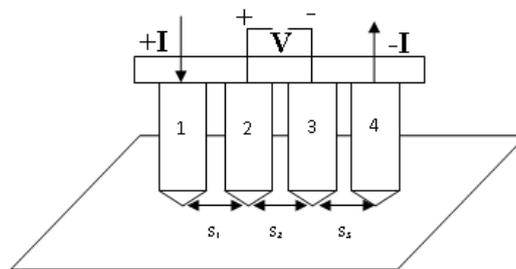
Gambar 3. Rangkaian pengubah arus ke tegangan

Berdasarkan Gambar 3, keluaran tegangan dari pengubah arus-ke-tegangan dihitung dengan Persamaan 3. Karena tegangan yang akan masuk ke mikrokontroler maksimal adalah +5 volt, rangkaian akan mengubah arus maksimal (3,3 mA) menjadi tegangan maksimal +5 volt. Berdasarkan Persamaan 3, diperlukan hambatan untuk pengatur register sebesar ±1.470 Ω.

$$V_{out} = i_{in} \cdot R_F \tag{3}$$

3.4. Desain Prob

Agar diperoleh faktor koreksi yang mendekati nilai satu desain prob menggunakan bahan tembaga (memiliki ρ sebesar $1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)^[9] dengan jarak antar spasi prob sebesar 2,5 mm. Pemilihan kombinasi pasangan arus dan tegangan yaitu prob 1 dan prob 4 sebagai injeksi arus sedangkan prob 2 dan prob 3 sebagai pengukur tegangan. Pemilihan kombinasi prob ditunjukkan pada Gambar 4.

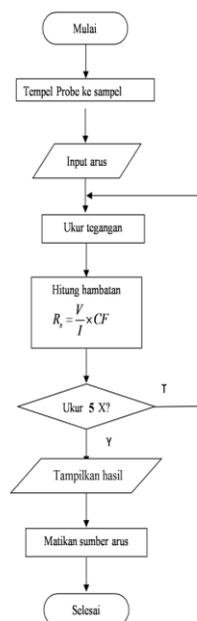


Gambar 4. Rancangan prob untuk injeksi arus dan respon tegangan

Nilai S_1 (arak antara prob 1 dan 2), S_2 (jarak antara prob 2 dan 3) dan S_3 (jarak antara prob 3 dan 4) dibuat seragam sebesar 2,5 mm. Tanda I+ adalah arus yang masuk ke prob dan I- arus yang keluar melewati prob.

3.2 Perancangan perangkat lunak

Perangkat lunak (*software*) merupakan pemroses hasil pengukuran arus dan tegangan hasil pengukuran *sheet resistance*. Pembacaan arus, tegangan dan perhitungan nilai *sheet resistance* serta tampilan di LCD dilakukan oleh mikrokontroler ATmega8535. Diagram alir perangkat lunak disajikan pada **Gambar 5**. Tampilan awal pada LCD sebelum melakukan pengukuran hanya menampilkan satuan arus, tegangan dan *sheet resistance*.



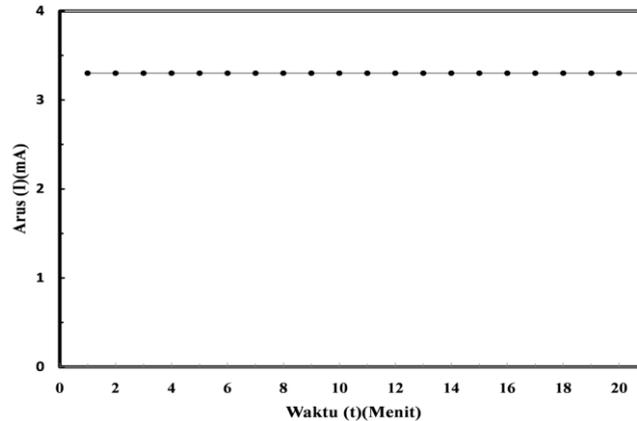
Gambar 5. Diagram alir sistem pengukuran *sheet resistance*

Sebelum sumber arus diberikan pada film, prob harus terpasang dahulu agar arus mengalir melalui prob dan diteruskan ke bahan uji. Saat arus mengalir, mikrokontroler akan mengukur nilai tegangan dari prob 2 dan prob 3 serta mengukur arus yang diberikan melalui prob 1 dan prob 4. Sebelum memasuki mikrokontroler arus akan dikonversi terlebih dahulu menjadi tegangan pada rangkaian konverter arus ke tegangan. Nilai tegangan dan kuat arus yang terukur akan digunakan untuk menghitung nilai lembaran resistansi. Pengukuran tersebut akan dilakukan berulang sebanyak lima kali. Nilai resistansi lembaran yang ditampilkan oleh LCD adalah nilai rata-ratanya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Sumber Arus Maksimum

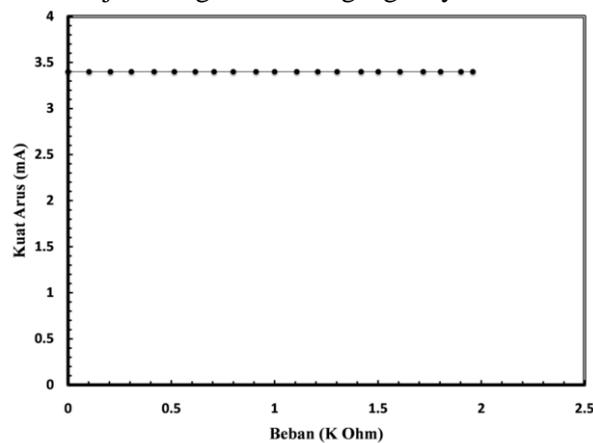
Gambar 6 memperlihatkan nilai kuat arus injeksi setiap 20 menit. Berdasarkan Gambar 6 dapat disimpulkan bahwa pengujian output sumber arus konstan adalah bernilai konstan selama 20 menit pengujian dengan nilai arus konstan sebesar 3,3 mA.



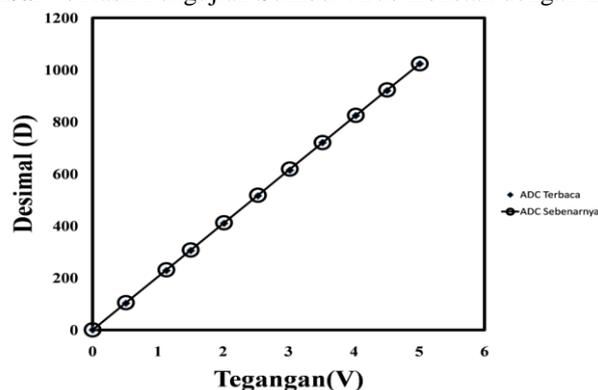
Gambar 6. Grafik Hasil Pengujian Sumber Arus Konstan

3.2. Pengujian Sumber Arus Konstan dengan Beban

Hasil dari pengujian sumber arus konstan dengan pemberian variasi beban diperlihatkan pada Gambar 7. Variasi nilai beban uji adalah 1 Ω hingga 2 kΩ. Berdasarkan Gambar 7, hasil pengujian sumber arus konstan dengan beban uji memperlihatkan nilai yang sesuai dengan yang dirancang. Nilai kuat arus keluaran dari sumber arus konstan adalah selalu konstan 3,3 mA untuk setiap perubahan beban uji sedangkan nilai tegangannya berubah.



Gambar 7. Hasil Pengujian Sumber Arus Konstan dengan Beban



Gambar 8. Grafik Hasil Pengujian Linieritas ADC

4.2. Pengujian Linieritas ADC

Hasil pengujian linearitas ADC diperlihatkan pada **Gambar 8**. Berdasarkan **Gambar 8** terlihat bahwa nilai desimal yang terbaca pada mikrokontroler berbanding lurus dengan perubahan tegangan. Validasi dilakukan dengan membandingkannya dengan nilai desimal hasil perhitungan manual.

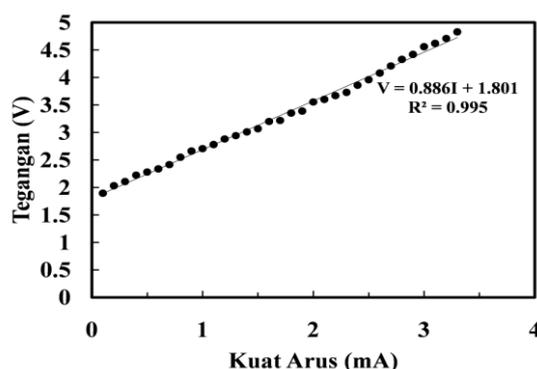
Dengan mengubah tegangan *input* yang masuk ke mikrokontroler, diperoleh bahwa nilai konversi ADC 10-bit sesuai dengan nilai perubahan tegangan sesuai dengan Persamaan 4.

$$ADC = \frac{V_{in}}{V_{ref}} \times 1023 \quad (4)$$

Nilai ADC hasil perhitungan manual diperoleh dengan menggunakan Persamaan 4 dan nilai ADC hasil pengukuran pada tampilan LCD. Hasil perbandingan tersebut diperlihatkan pada Gambar 8. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai ADC hasil perhitungan dengan nilai ADC hasil pembacaan berada pada garis yang sama, menunjukkan bahwa nilai desimalnya tidak jauh berbeda.

4.3. Pengujian Linieritas Pengubah Arus ke Tegangan

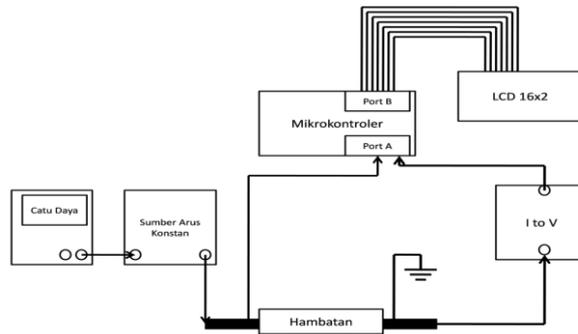
Gambar 9 memperlihatkan nilai tegangan keluaran rangkaian pengubah arus-ke-tegangan terhadap kuat arus masukan. Berdasarkan hasil Gambar 9 dapat diketahui bahwa rangkaian pengubah arus-ke-tegangan menunjukkan hubungan yang linear, mengubah nilai arus konstan 0 – 3,3 mA menjadi nilai tegangan sebesar 0 - 5 Volt. Tegangan yang telah dikonversi ini nantinya yang akan menjadi masukan bagi mikrokontroler.



Gambar 9. Hasil Pengujian rangkaian pengubah arus-ke-tegangan

Pengujian Pengukuran Arus dan Tegangan dengan Mikrokontroler

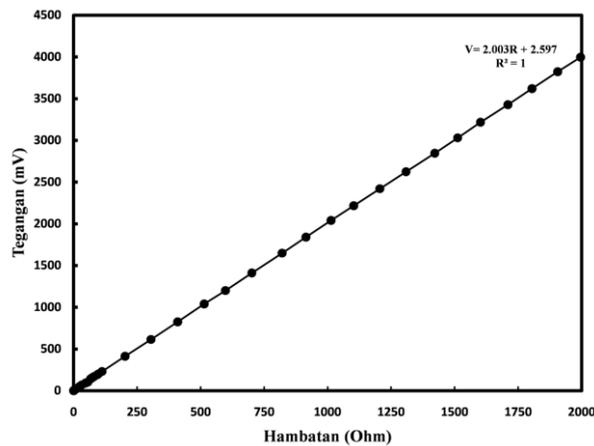
Pengujian pengukuran arus dan tegangan bertujuan untuk menguji kemampuan mikrokontroler sebagai pengukur arus dan tegangan sebagai fungsi dari resistansi (**Gambar 10**). Pengujian resistansi dilakukan dengan memvariasikan nilai hambatan sebuah resistor (*potensio multiturn*) yang telah diketahui nilai resistansinya dan dengan mengukur nilai kuat arus serta tegangan



Gambar 10. Pengujian Pengukuran Arus dan Tegangan dengan Mikrokontroler

Nilai arus konstan awal yang diberikan pada rangkaian yang diperlihatkan pada Gambar 10 adalah 2 mA. Nilai arus konstan tersebut dipilih sebagai acuan. Hasil pengujian pengukuran arus dan tegangan disajikan pada Gambar 11.

Gambar 11 menunjukkan bahwa saat kuat arus ditetapkan sebesar 2 mA dengan nilai hambatan divariasikan, tegangan yang terbaca pada LCD berubah sesuai dengan besar hambatan yang sedang diuji.

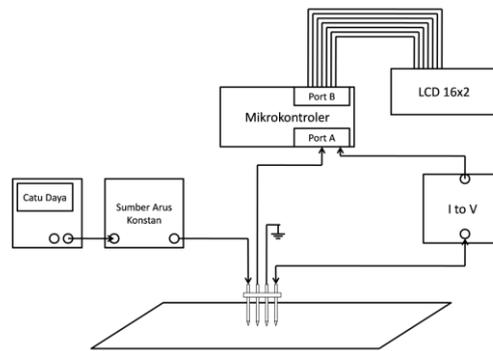


Gambar 11. Hasil Pengujian Pengukuran Arus dan Tegangan

Saat nilai hambatan yang ditampilkan LCD dibandingkan dengan nilai hambatan yang terbaca pada resistor (sebenarnya) maka akan terlihat adanya perbedaan nilai hambatan. Perbedaan nilai hambatan ini cenderung bernilai besar saat diberikan hambatan yang kecil (kurang dari 2 Ω). Sebaliknya pada hambatan yang bernilai besar selisih nilai perbedaannya relatif kecil (ratusan sampai ribuan Ω). Hal tersebut disebabkan oleh resolusi mikrokontroler ATmega8535 sebesar 4,88 mV. Berdasarkan Gambar 11 dapat dilihat bahwa hasil pengukuran tegangan dan arus bernilai linier.

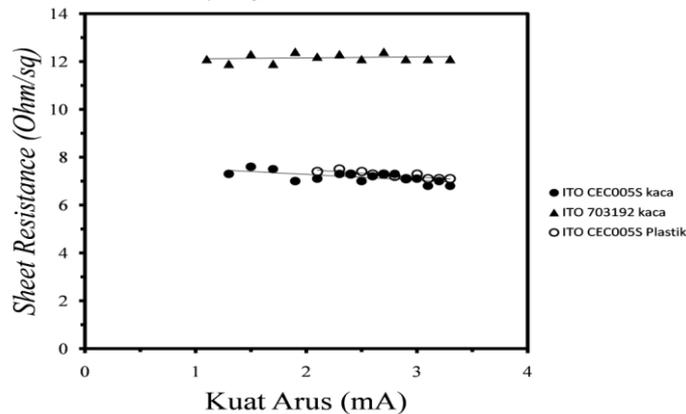
Pengujian Alat Ukur Resistansi Lembaran Film Tipis Komersial

Pengujian ini bertujuan untuk menguji alat ukur *sheet resistance* yang telah dirancang dengan cara mengukur nilai resistansi lembaran ITO komersil seri 703192 dengan nilai resistansi lembaran 8-12 Ω/sq dan CEC005S (5 Ω/sq). Pengukuran dilakukan dengan menempelkan prob pada film ITO lalu mengukur nilai tegangan dan kuat arusnya. Diagram blok pengujian alat ukur resistansi lembaran diperlihatkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Diagram Blok Pengujian Alat Ukur Sheet Resistance

Pengujian alat ukur dilakukan dengan memberikan variasi nilai arus konstan yang akan dialirkan pada bahan uji. Rentang nilai arus injeksi adalah 0.5 - 3,3 mA dengan interval 0,2 mA. Saat arus mengalir melalui prob 1 dan prob 4, terukur besarnya beda potensial pada prob 2 dan prob 3 yang nilainya dikirim ke mikrokontroler untuk dihitung nilai sheet resistance sesuai dengan nilai tegangan dan kuat arus yang terukur.



Gambar 13. Grafik pengukuran sheet resistance pada ITO

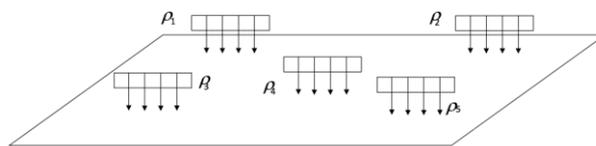
Gambar 13 memperlihatkan hasil pengukuran resistansi lembaran film tipis komersial. Berdasarkan Gambar 13 terlihat bahwa sheet resistance dari dua buah ITO yang bernilai di sekitar 12,2 dan 7,2 Ω/sq terbaca konstan. Pada praktiknya terjadi kesalahan pengukuran yang besar (44%) saat pengukuran dilakukan dengan menggunakan nilai kuat arus yang kecil (di bawah 1,1 mA). Sedangkan untuk nilai kuat arus yang besar, nilai kesalahan yang terjadi relatifnya kecil (0,83%). Hal ini disebabkan oleh kesalahan pengukuran pada tegangan saat pengukuran dilakukan dengan kuat arus yang kecil. Hal tersebut juga sudah dilihat saat pengujian pengukuran resistansi lembaran menggunakan pembebanan. Untuk menanggulangi kesalahan tersebut, penggunaan ADC eksternal untuk menambah tingkat resolusi perlu dilakukan. Hasil pengukuran sheet resistance adalah konstan dengan nilai 12,2 dan 7,2 Ω/sq. Dikarenakan pengujian dilakukan menggunakan bahan uji yang sama (ITO seri 703192 dan CEC005S) maka nilai resistansi lembarannya sama, dan untuk ITO CEC005S kesalahan relatif besar (44%) karena hambatan permukaan yang diukur nilainya lebih kecil. Nilai kesalahan relatif ditentukan dengan membandingkan nilai rata-rata hasil pengukuran dengan nilai acuannya.

$$KSR = \left| \frac{5 - 7.2}{5} \right| \times 100\%$$

$$KSR = 44\%$$

Kesalahan relatif yang besar terjadi karena pengukuran terjadi pada daerah pengukuran yang kecil sehingga perubahan kecil dari pengukuran akan berdampak besar pada hasil resistansi lembaran.

Pengujian sesuai dengan blok diagram pada **Gambar 12** dilakukan dengan melakukan kontak *prob* dengan ITO sebanyak lima kali dengan lokasi seperti ditunjukkan pada **Gambar 14**.



Gambar 14. Lokasi Titik Pengukuran pada Film ITO

Pemberian kontak diatur sebanyak lima kali pada posisi yang berbeda bertujuan untuk melakukan pengukuran berulang yang selanjutnya nilai rata-ratanya yang akan ditampilkan pada LCD. Nilai sheet resistance yang terbaca pada LCD merupakan hasil setelah dilakukan kontak sebanyak lima kali sesuai dengan **Gambar 14**. Jika melakukan kontak antara prob dengan film ITO kurang atau lebih dari lima kali maka hasil pengukuran tidak akan terbaca pada LCD.

4. Simpulan

Telah berhasil dirancang bangun alat ukur *sheet resistance* dengan metode *four point probe*. Kinerja dan spesifikasi sistem pengukuran *sheet resistance* adalah sebagai berikut (i) memiliki nilai *output* arus konstan maksimum sebesar 3,3 mA dengan presisi 0,1 mA, (ii) pengukuran kuat arus dan tegangan menggunakan mikrokontroler ATmega8535 dengan daerah pengukuran 0,9 – 3,3 mA dan 4,88– 5000 mV, dan (iii) mampu melakukan pengukuran berulang maksimal lima kali.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini sebagian didukung dari Program *Academic Leadership Grant* (ALG) Universitas Padjadjaran Tahun 2016 atas nama Prof. Dr. Bernard Y. Tumbelaka, M.Eng. Ucapan terima kasih dan apresiasi yang tinggi kepada Universitas Padjadjaran.

Daftar Pustaka

- [1] E. S. Machlin, *Materials Science in Microelectronics: The Relationships between Thin Film Processing and Structure*, Giro Press, Croton-on-Hudson, NY, 1995.
- [2] ASTM Standard D 257 *Standard Method for DC Resistance of Conductance of Insulating Materials* 1993 American Society of Testing Materials, Philadelphia, 1993, pp.103-119.
- [3] D. L. Smith, *Thin Film Deposition: Principles and Practice*, McGraw-Hill, Boston, MA, 1995.
- [4] S. A Halperin, *The difference between surface resistance and surface resistivity*, EE: Evaluation Engineering, 35 (6), 49-50 (1996).
- [5] L. J. Van der Pauw, *A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape*. Philips Research Reports 12.1 (1958): 1-9.
- [6] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 1981 p.30-35.
- [7] D. K. Schroder, *Semiconductor material and device characterization*, John Wiley & Sons, 1990 pp. 2-34.
- [8] W. R. Runyan, *Semiconductor measurements and Instrumentation*, (McGraw Hill, 1975) pp.65-93.
- [9] B. Arifianto, 2009 *Training mikrokontrollet for beginner*.<http://www.max-tron.com> diunduh 19 maret 2012.