

Transistor Efek Medan Berbasis Semikonduktor Organik *Pentacene* untuk Sensor Kelembaban

Fadliandi¹, Budiyanto²

Abstract—The purpose of this paper is to fabricate a humidity sensor from organic semiconductor and to understand the effect of the transistor's structure on the sensitivity of humidity sensor. Organic MOSFETs were fabricated using organic semiconductor called pentacene. The structures were bottom-contact and top-contact. The bottom-contact pentacene MOSFET was more sensitive to humidity than the top-contact pentacene MOSFET was. When the relative humidity increased from 20 % to 70 %, for $V_{GS} = V_{DS} = -5$ V, the magnitude of drain source current of the MOSFET decreased from 0.45 μ A to 0.1 μ A for bottom-contact pentacene MOSFET and from 3.6 μ A to 3 μ A for top-contact pentacene MOSFET. As the relative humidity increased from 20 % to 70 %, for $V_{GS} = 2$ V and $V_{DS} = -5$ V, the magnitude of drain source current of the MOSFET increased from 0.77 nA to 3 nA for bottom-contact pentacene MOSFET and from 0.6 nA to 1.4 nA for top-contact pentacene MOSFET. As the relative humidity increased from 20 % to 70 %, the threshold voltage shifted toward positive direction, from 0.5 V to 2 V for bottom-contact pentacene MOSFET and from 1 V to 2 V for top-contact pentacene MOSFET. The result showed that the pentacene MOSFET with bottom-contact structure was more suitable for humidity sensor than that with top-contact structure.

Intisari— Tujuan makalah ini adalah untuk melakukan fabrikasi sensor kelembaban dari bahan semikonduktor organik dan untuk melihat pengaruh struktur transistor terhadap sensitivitas terhadap kelembaban. MOSFET dari bahan semikonduktor *pentacene* telah difabrikasi. Struktur yang difabrikasi adalah *bottom-contact* dan *top-contact*. MOSFET *pentacene bottom-contact* lebih sensitif terhadap kelembaban dibandingkan dengan *MOSFET pentacene top-contact*. Saat kelembaban relatif naik dari 20% ke 70%, besar arus *drain source* dari *MOSFET pentacene*, saat $V_{GS} = V_{DS} = -5$ V, berkurang dari 0,45 μ A ke 0,1 μ A untuk *MOSFET pentacene bottom-contact* dan berkurang 3,6 μ A ke 3 μ A untuk *MOSFET pentacene top-contact*. Sementara, saat kelembaban relatif naik meningkat dari 20% ke 70%, besar arus *drain source* dari *MOSFET pentacene*, saat $V_{GS} = 2$ V, $V_{DS} = -5$ V, meningkat dari 0,77 nA ke 3 nA untuk *MOSFET pentacene bottom-contact* dan meningkat dari 0,6 nA ke 1,4 nA untuk *MOSFET pentacene top-contact*. Saat kelembaban relatif naik dari 20% ke 70%, tegangan ambang bergeser dari 0,5 V ke 2 V untuk *MOSFET pentacene bottom-contact* dan dari 1 V ke 2 V untuk *MOSFET pentacene top-contact*. Hasil menunjukkan bahwa *MOSFET pentacene* dengan struktur *bottom-contact* lebih cocok untuk sensor kelembaban dibandingkan struktur *top-contact*.

Kata Kunci— Transistor, MOSFET, organik, *pentacene*, sensor, kelembaban, elektronika.

I. PENDAHULUAN

Elektronika organik, yang merupakan bidang yang luas yang memanfaatkan karakteristik elektronik di dalam polimer dan molekul organik rendah, sudah berada jauh dari sekedar istilah riset yang spesifik [1]. Perkembangan bahan semikonduktor organik yang sangat cepat membuka peluang untuk fabrikasi MOSFET organik pada substrat yang luas dengan biaya dan temperatur yang rendah [2]. Elektronika organik juga memiliki beberapa keuntungan, yakni ringan, tipis, lentur, dan tidak merusak lingkungan, sehingga menarik perhatian peneliti di seluruh dunia [3].

MOSFET organik memiliki aplikasi yang sangat luas seperti RFID, sensor, dan *display* [4]. Salah satu bahan semikonduktor organik yang paling luas digunakan adalah *pentacene*, yang memiliki mobilitas *hole* yang dapat mencapai 1 $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ [5]. Meskipun MOSFET organik memiliki mobilitas pembawa muatan yang lebih rendah dan sub-ambang *slope* yang lebih besar dari MOSFET konvensional, MOSFET organik bisa diaplikasikan untuk peranti fleksibel. Peranti fleksibel sulit difabrikasi pada substrat inorganik seperti silikon. Saat ini sudah ada grup laboratorium yang melakukan fabrikasi rangkaian analog dan digital dari bahan organik [6]. MOSFET organik yang terbuat dari *pentacene* memiliki struktur *top-contact* dan *bottom-contact* [7]. *Pentacene* dideposisikan dengan menggunakan metode evaporasi termal dan performa perantinya sangat sensitif terhadap dielektrik tempat *pentacene* dideposisikan, terhadap perlakuan permukaannya, dan kondisi proses seperti laju deposisi, suhu substrat, dan *annealing* setelah deposisi [8]. MOSFET organik yang terbuat dari bahan *pentacene* juga sensitif terhadap uap air dan gas [9]. Berdasarkan keuntungan-keuntungan tersebut, MOSFET *pentacene* bisa diaplikasikan untuk sensor kelembaban. Pada makalah ini, substrat silikon, SiO_2 , Au, dan *pentacene* digunakan untuk melakukan fabrikasi MOSFET organik berstruktur *top-contact* dan *bottom-contact* yang digunakan untuk sensor kelembaban. Unjuk kerja yang diamati adalah unjuk kerja *pentacene* terhadap perubahan kelembaban. Parameter unjuk kerja yang diamati adalah arus *drain source* dan waktu respons.

II. METODOLOGI

Gbr. 1 masing-masing menunjukkan urutan fabrikasi MOSFET *pentacene bottom-contact* dan *top-contact*. Perbedaan urutan fabrikasinya adalah bahwa pada struktur *bottom-contact* semikonduktor *pentacene* dideposisikan setelah pembentukan elektrode *source* dan *drain*, sementara pada struktur *top-contact* semikonduktor *pentacene* dideposisikan sebelum pembentukan elektrode *source* dan *drain*. Gbr 2 menunjukkan skematik tampak atas MOSFET

^{1,2} Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27, Jakarta, 10510, INDONESIA (telp: 021-4256024; email: fadliandi@ftumj.ac.id)

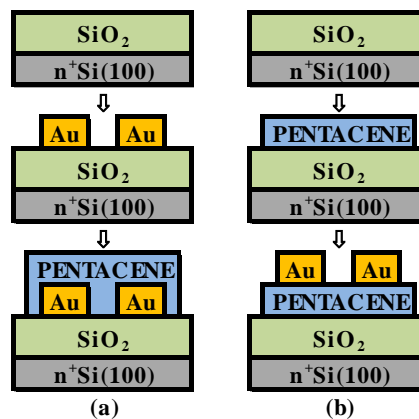
pentacene yang berstruktur *bottom-contact* dan *top-contact*. Untuk melakukan fabrikasi MOSFET yang berstruktur *bottom-contact*, pertama-tama lapisan insulator SiO₂ dengan ketebalan 12 nm ditumbuhkan dengan menggunakan metode oksidasi termal pada wafer silikon tipe n yang ter-dop berat. Wafer silikon yang ter-dop berat ini memiliki hambatan jenis yang sangat rendah, sekitar 0,001 ~ 0,006 Ω.cm, sehingga konduktivitasnya sangat tinggi. Wafer silikon ini bekerja sebagai elektrode *gate*. Setelah itu, elektrode *source* dan *drain* dengan ketebalan 31 nm dibentuk dari Au dengan metode evaporasi termal melalui *shadow mask*. Selanjutnya, semikonduktor organik *pentacene* dengan tebal 51 nm dideposisikan dengan menggunakan metode evaporasi termal pada suhu ruang dengan kevakuman 7,7x10⁻⁶ Torr, juga melalui *shadow mask*. Untuk melakukan fabrikasi MOSFET yang berstruktur *top-contact*, *pentacene* dideposisikan terlebih dahulu. Setelah itu, elektrode *source* dan *drain* dibentuk. Panjang kanal dan lebar kanal dari MOSFET organik *pentacene* adalah 198 μm dan 498 μm. Setelah fabrikasi selesai, karakteristik kelistrikan I_D-V_D dan I_D-V_G serta waktu respons dari MOSFET organik *pentacene* diukur. Gbr. 3 menunjukkan foto transistor *bottom-contact* yang telah dibuat. Gbr. 4 masing-masing menunjukkan skematik pengukuran karakteristik listrik dari MOSFET *pentacene bottom-contact* dan *top-contact*. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan *micropositioner* dan *semiconductor parameter analyzer*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

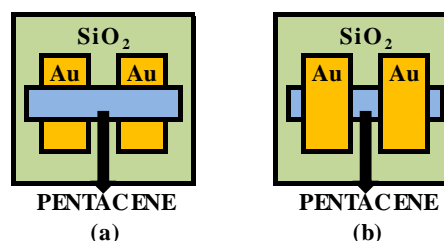
Gbr. 5 menunjukkan karakteristik I_D-V_D MOSFET *pentacene bottom-contact*. Sumbu horizontal menunjukkan tegangan *drain source* dan sumbu vertikal menunjukkan arus *drain source*. Secara keseluruhan, ketika tegangan diubah dari 2 V menuju -5 V, besar arus *drain source* menjadi bertambah. Pertambahan arus *drain source* seiring dengan perubahan tegangan *gate* ke arah negatif diakibatkan oleh bertambahnya muatan pembawa *hole* positif yang terinduksi oleh tegangan *gate* negatif. Sementara ketika tegangan *drain* semakin negatif, arus *drain source* bertambah, tetapi pada suatu tegangan arus menjadi jenuh dan tidak bertambah lagi. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya dengan transistor yang harus beroperasi pada tegangan puluhan volt, hasil ini mempunyai kelebihan, yakni transistor bisa beroperasi pada tegangan 5 V [10]. Ini dikarenakan transistor memiliki tebal dielektrik isolator SiO₂ yang tipis (12 nm). Selain itu, secara keseluruhan, ketika kelembaban relatif meningkat, besar arus *drain source* berkurang akibat molekul-molekul air yang terjebak di antarmuka antara lapisan semikonduktor *pentacene* dan elektrode Au [10], [11]. Gbr. 5(a) menunjukkan karakteristik I_D-V_D ketika kelembaban relatif 20%, Gbr. 5(b) menunjukkan karakteristik I_D-V_D ketika kelembaban relatif 40%, Gbr. 5(c) menunjukkan karakteristik I_D-V_D ketika kelembaban relatif 60%, dan Gbr. 5(d) menunjukkan karakteristik I_D-V_D ketika kelembaban relatif 70%. Saat kelembaban 20 %, besar arus *drain source* ketika tegangan *gate* = tegangan *drain* = -5 V adalah sekitar 0,45 μA. Saat

kelembaban 40%, besar arus *drain source* berkurang lagi menjadi 0,25 μA. Ketika kelembaban relatif 70 %, arus *drain source* berkurang drastis menjadi 0,1 μA. Sensitivitas ini dapat dimanfaatkan sebagai sensor kelembaban.

Gbr. 6 menunjukkan karakteristik I_D-V_D MOSFET *pentacene-top contact*. Sumbu horizontal menunjukkan tegangan *drain source* dan sumbu vertikal menunjukkan arus *drain source*. Sama seperti MOSFET *pentacene bottom-contact*, secara keseluruhan, ketika tegangan diubah dari 2 V menuju -5 V, besar arus *drain source* menjadi bertambah.



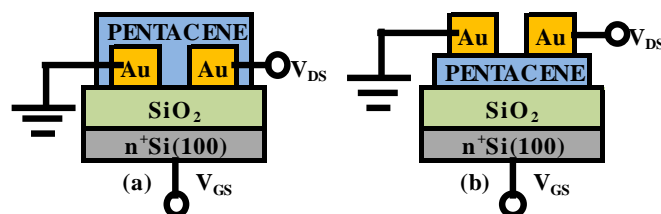
Gbr. 1 Urutan fabrikasi MOSFET organik *pentacene*, (a) *bottom-contact*, (b) *top-contact*.



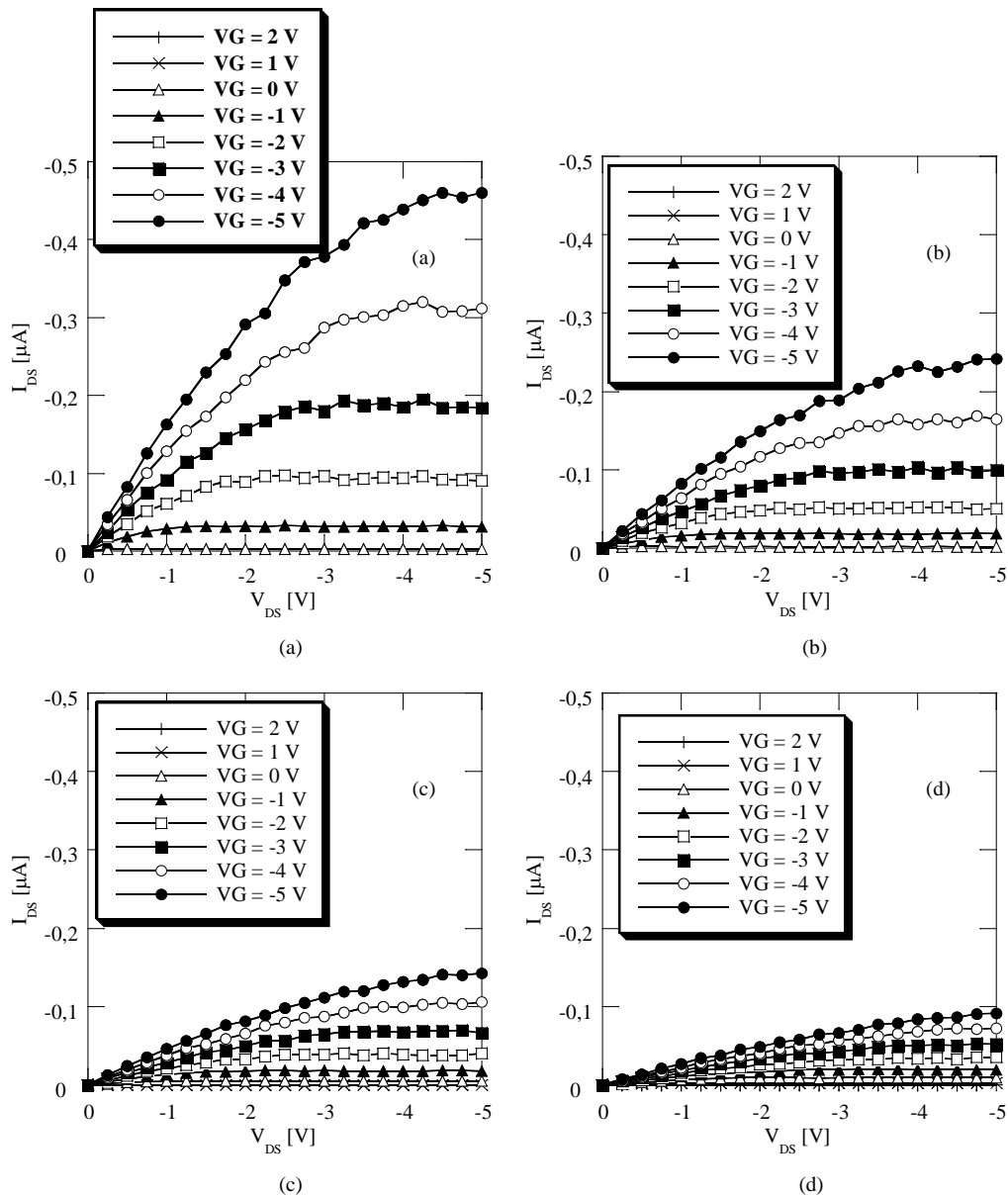
Gbr. 2 Skematik tampak atas MOSFET organik *pentacene*, (a) *bottom-contact*, (b) *top-contact*.



Gbr. 3 Foto transistor *bottom contact*.



Gbr. 4 Pengukuran karakteristik listrik MOSFET organik *pentacene*, (a) *bottom-contact*, (b) *top-contact*.



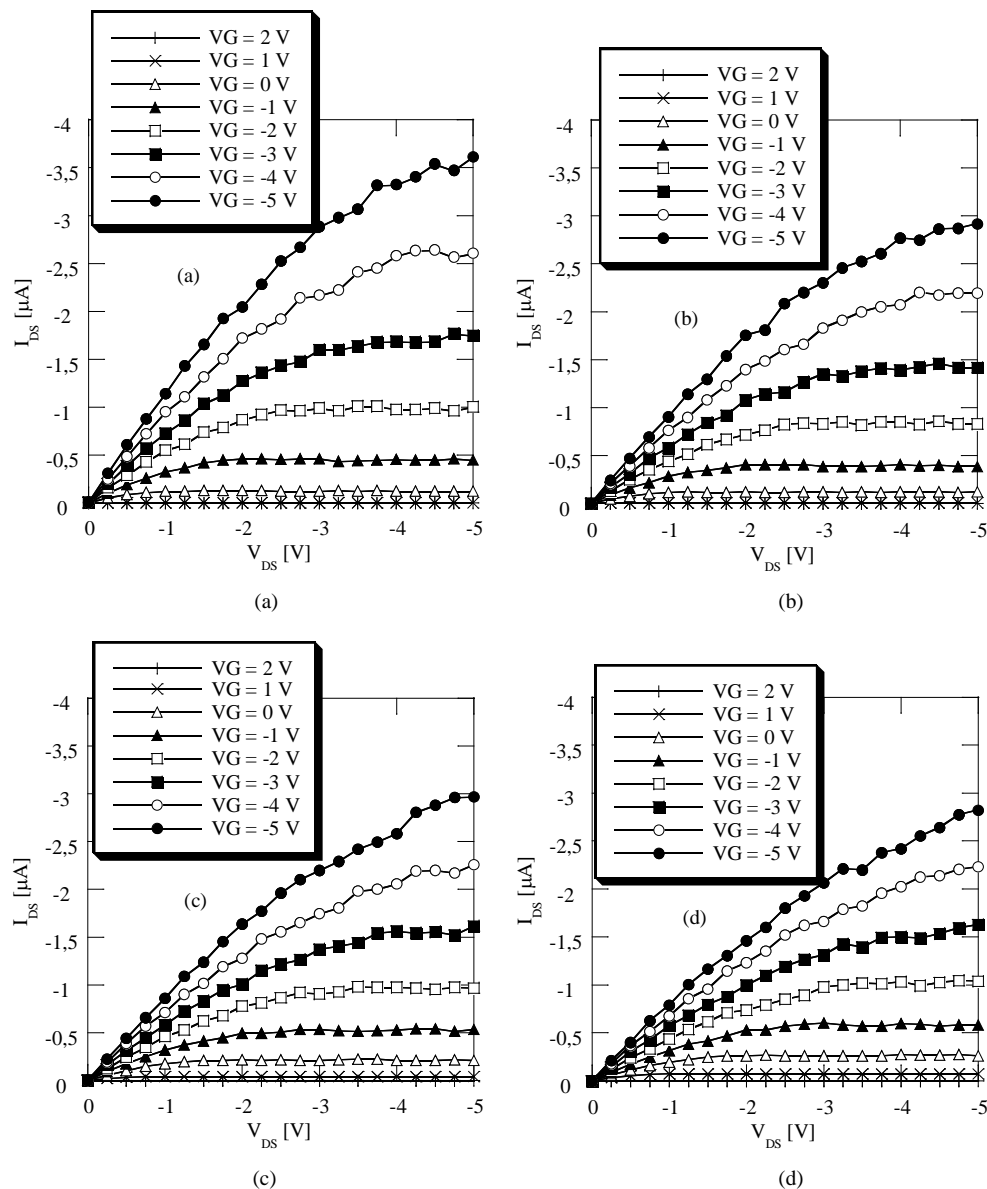
Gbr. 5 Ketergantungan karakter I_D - V_D MOSFET pentacene *bottom-contact* terhadap kelembaban relatif, (a) 20%, (b) 40%, (c) 60%, (d) 70%.

Gbr. 6(a) menunjukkan karakteristik I_D - V_D ketika kelembaban relatif 20%, Gbr. 6(b) menunjukkan karakteristik I_D - V_D ketika kelembaban relatif 40%, Gbr. 6(c) menunjukkan karakteristik I_D - V_D ketika kelembaban relatif 60%, dan Gbr. 6(d) menunjukkan karakteristik I_D - V_D ketika kelembaban relatif 70%. Saat kelembaban 20%, besar arus *drain source* ketika tegangan *gate* = tegangan *drain* = -5 V adalah sekitar 3,6 μA , saat kelembaban 40%, besar arus *drain source* berkurang lagi menjadi 3 μA , dan ketika kelembaban relatif 70%, arus *drain source* berkurang sedikit menjadi 2,8 μA .

Gbr. 7 menunjukkan perubahan besar arus *drain source* ketika $V_{GS} = V_{DS} = -5\text{V}$. Sumbu horizontal menunjukkan kelembaban relatif, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan besar arus *drain source* saat $V_{GS} = V_{DS} = -5\text{V}$. Sumbu vertikal ditampilkan dengan skala logaritmik. Gbr. 7 menunjukkan bahwa MOSFET *pentacene bottom-contact* lebih sensitif

terhadap kelembaban dibandingkan dengan MOSFET *pentacene top-contact*, sehingga untuk masa depan, MOSFET *pentacene bottom-contact* bisa diaplikasikan sebagai sensor kelembaban karena sensitivitasnya yang baik dibandingkan MOSFET *pentacene top-contact* [12].

Gbr. 8 menunjukkan karakteristik I_D - V_G MOSFET *pentacene bottom-contact*. Sumbu horizontal dan vertikal, dalam skala logaritmik, masing masing menunjukkan tegangan *gate* dan besar arus *drain source*. Secara keseluruhan, ketika kelembaban relatif meningkat, besar arus *on* (arus saat $V_G = -5\text{V}$) berkurang, besar arus *off* (arus saat $V_G = 2\text{V}$) meningkat, dan tegangan ambang bergeser ke arah positif. Ketika kelembaban relatif meningkat dari 20% ke 70%, besar arus *on* berkurang secara drastis dari sekitar $4,6 \times 10^{-7}\text{A}$ menjadi $9 \times 10^{-8}\text{A}$. Arus *off* meningkat dari sekitar $7,7 \times 10^{-10}\text{A}$ menjadi $3,3 \times 10^{-9}\text{A}$. Sementara tegangan ambang bergeser ke arah positif dari sekitar 0,5 V ke 2 V.

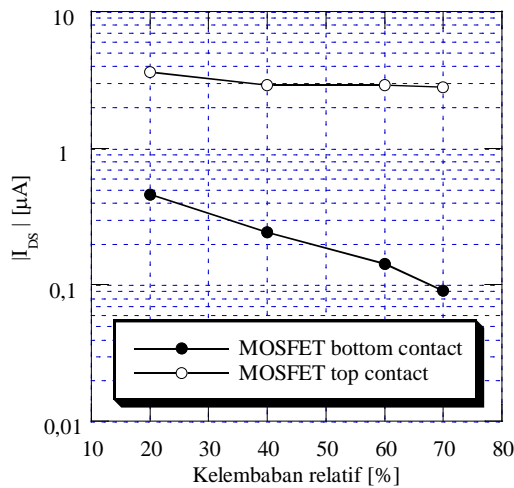


Gbr. 6 Ketergantungan karakter I_D - V_D MOSFET *pentacene top-contact* terhadap kelembaban relatif, (a) 20%, (b) 40% (c), 60%, (d) 70%.

Tabel I menunjukkan pengaruh kelembaban terhadap arus *on*. Ketika kelembaban relatif meningkat, arus *on* pada transistor *bottom-contact* berkurang drastis dibandingkan pada transistor *top-contact*. Tabel II menunjukkan pengaruh kelembaban terhadap arus *off*. Ketika kelembaban relatif meningkat, arus *off* pada transistor *bottom-contact* meningkat drastis dibandingkan pada transistor *top-contact*.

Gbr. 9 menunjukkan karakteristik I_D - V_G MOSFET *pentacene top-contact*. Sumbu horizontal dan vertikal, dalam skala logaritmik, masing-masing menunjukkan tegangan *gate* dan besar arus *drain source*. Secara keseluruhan, ketika kelembaban relatif meningkat, besar arus *on* (arus saat $V_G = -5$ V) berkurang, besar arus *off* (arus saat $V_G = 2$ V) meningkat, dan tegangan ambang bergeser ke arah positif. Ketika kelembaban relatif meningkat dari 20% ke 70%, besar arus *on* berkurang sedikit sekali, dari sekitar $3,6 \times 10^{-6}$ A ke $2,8 \times 10^{-6}$ A. Arus *off* meningkat dari sekitar 6×10^{-10} A ke $1,4 \times 10^{-9}$ A.

Sementara tegangan ambang bergeser ke arah positif, dari sekitar 1 V ke 2 V. Baik pada MOSFET *pentacene bottom-contact* maupun *top-contact*, pergeseran tegangan ambang ke arah positif mengindikasikan bahwa muatan yang bergerak (*mobile charges*) bisa diinduksikan pada lapisan semikonduktor oleh molekul uap air, sehingga tegangan *gate* positif yang besar dibutuhkan untuk mengkompensasi muatan *hole* untuk mematikan MOSFET tersebut [12]. Semikonduktor organik seperti *pentacene* cenderung membentuk *grain* yang kecil pada elektrode sehingga ukuran *grain* dekat elektrode *drain* dan *source* menjadi kecil. Dibandingkan dengan MOSFET *top-contact*, MOSFET *bottom-contact* memiliki lebih banyak *grain boundary*, sehingga dapat menangkap molekul-molekul uap air. Salah satu aplikasi sensor kelembaban adalah untuk pengendalian *green house* [13]. Ada juga laboratorium yang sudah mengembangkan sensor gas dengan menggunakan transistor nonorganik [14].



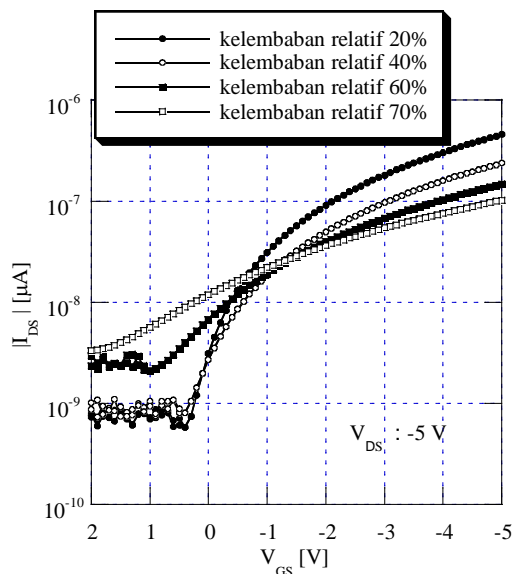
Gbr. 7 Perubahan besar arus drain source ketika $V_{GS} = V_{DS} = -5$ V terhadap kelembaban relatif.

TABEL I
PENGARUH KELEMBABAN RELATIF TERHADAP ARUS ON.

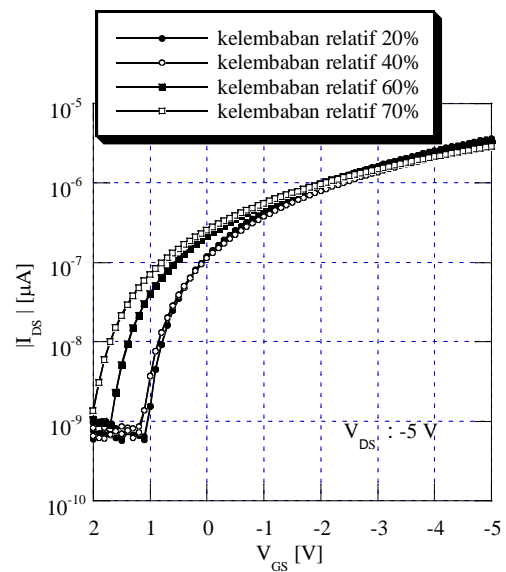
Kelembaban relatif [%]	$ I_{DS} $ saat $V_{GS} = V_{DS} = -5$ V (arus on dalam μA)	
	Arus top-contact	Arus bottom-contact
20	3,60	0,46
40	2,90	0,24
60	2,90	0,14
70	2,80	0,09

TABEL II
PENGARUH KELEMBABAN RELATIF TERHADAP ARUS OFF.

Kelembaban relatif [%]	$ I_{DS} $ saat $V_{GS} = 2$ V, $V_{DS} = -5$ V (arus off dalam nA)	
	Arus top-contact	Arus bottom-contact
20	0,60	0,77
40	0,83	0,87
60	1,03	2,97
70	1,39	3,31

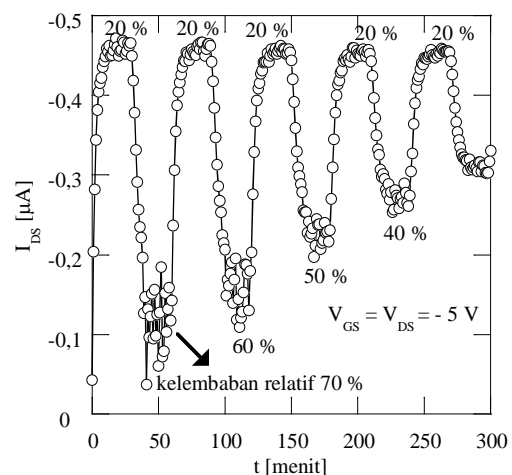


Gbr. 8 Ketergantungan karakter I_D - V_G MOSFET pentacene bottom-contact terhadap kelembaban relatif.

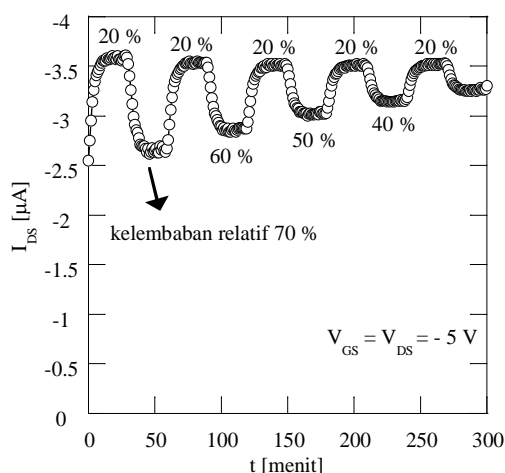


Gbr. 9 Ketergantungan karakter I_D - V_G MOSFET pentacene top-contact terhadap kelembaban relatif.

Gbr. 10 dan Gbr. 11 menunjukkan arus drain source yang diukur pada saat $V_D = V_G = -5$ V sebagai fungsi waktu. MOSFET pentacene dipaparkan terhadap kelembaban yang berbeda-beda secara silih berganti. Saat kelembaban relatifnya 20%, besar arusnya adalah sekitar $0,45 \mu A$ dan berkurang secara drastis ketika kelembaban relatifnya 70%. Setelah itu, ketika uap air dipompa keluar, arus drain source kembali lagi ke level 20%. Ini menunjukkan bahwa perubahan arus jenuh drain source bersifat reversibel. Sekali lagi, dari Gbr. 10 dan Gbr. 11, dapat dilihat bahwa MOSFET pentacene bottom-contact lebih sensitif terhadap perubahan kelembaban dibandingkan dengan MOSFET pentacene top-contact. Harus diperhatikan bahwa karena volume chamber yang besar, respons transien yang ditunjukkan pada Gbr. 10 dan Gbr. 11 tidak mencerminkan waktu respons intrinsik MOSFET tersebut.



Gbr. 10 Waktu respons MOSFET pentacene bottom-contact terhadap kelembaban relatif.



Gbr. 11 Waktu respons MOSFET *pentacene top-contact* terhadap kelembaban relatif.

IV. KESIMPULAN

MOSFET dari bahan semikonduktor *pentacene* telah berhasil dibuat. Struktur yang dibuat adalah *bottom-contact* dan *top-contact*. MOSFET *pentacene bottom-contact* lebih sensitif terhadap kelembaban dibandingkan dengan MOSFET *pentacene top-contact*. Saat kelembaban relatif naik dari 20% ke 70%, besar arus *drain source* MOSFET *pentacene* saat $V_{GS} = V_{DS} = -5$ V berkurang dari $0,46 \mu\text{A}$ ke $0,09 \mu\text{A}$ untuk MOSFET *pentacene bottom-contact* dan berkurang $3,6 \mu\text{A}$ ke $2,8 \mu\text{A}$ untuk MOSFET *pentacene top-contact*.

Saat kelembaban relatif meningkat dari 20% ke 70%, arus *drain source* MOSFET *pentacene* saat $V_{GS} = 2$ V, $V_{DS} = -5$ V meningkat dari $0,77$ nA ke $3,31$ nA untuk MOSFET *pentacene bottom-contact* dan meningkat dari $0,6$ nA ke $1,39$ nA untuk MOSFET *pentacene top-contact*.

Saat kelembaban relatif naik dari 20% ke 70%, tegangan ambang bergeser dari $0,5$ V ke 2 V untuk MOSFET *pentacene bottom-contact* dan 1 V ke 2 V untuk MOSFET *pentacene top-contact*.

REFERENSI

- [1] R. Mac Ciarnain, D. Michaelis, T. Wehler, A.F. Rausch, N. Danz, A. Brauer, A. Tünnermann, "Emission from outside of the emission layer in state-of-the-art phosphorescent organic light-emitting diodes," *Organic Electronics*, vol. 44, hal. 115-119, Feb. 2017.
- [2] R. Lassniga, M. Hollerer, B. Striedinger, A. Fian, B. Stadlober, A. Winkler, "Optimizing pentacene thin-film transistor performance: Temperature and surface condition induced layer growth modification," *Organic Electronics*, vol. 26, hal. 420-428, Agu. 2015.
- [3] Huabin Sun, Yao Yin, Qijing Wang, Qian Jun, Yu Wang, Kazuhito Tsukagoshi, Xizhang Wang, Zheng Hu, Lijia Pan, Youdou Zheng, Yi Shi, and Yun Li, "Reducing contact resistance in ferroelectric organic transistors by buffering the semiconductor/dielectric interface," *Applied Physics Letters*, vol. 107, Agt. 2015.
- [4] Sheida Faraji, Teruo Hashimoto, Michael L. Turner, Leszek A. Majewski, "Solution-processed nanocomposite dielectrics for low voltage operated OFETs," *Organic Electronics*, vol. 17, hal. 178-183, Des. 2015.
- [5] Masakazu Nakamura dan Ryosuke Matsubara, "Carrier Mobility in Organic Thin-film Transistors: Limiting Factors and Countermeasures," *Journal of Photopolymer Science and Technology*, vol. 27, hal. 307-316, Jun. 2014.
- [6] Kenjiro Fukuda, Yasunori Takeda, Yudai Yoshimura, Rei Shiwaku, Lam Truc Tran, Tomohito Sekine, Makoto Mizukami, Daisuke Kumaki dan Shizuo Tokito, "Fully-printed high-performance organic thin-film transistors and circuitry on one-micron-thick polymer films," *Nature Communications*, vol. 5, hal. 1-8, Jun. 2014.
- [7] Imad Benacer dan Zohir Dibi, "Modeling and Simulation of Organic Field Effect Transistor (OFET) Using Artificial Neural Networks," *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 66, hal. 79-88, 2014.
- [8] D. Martin Taylor, Eifion R. Patchett, Aled Williams, Nikola Joncew Neto, Ziqian Ding, Hazel E. Assender, John J. Morrison, and Stephen G. Yeates, "Organic Digital Logic and Analog Circuits Fabricated in a Roll-to-Roll Compatible Vacuum-Evaporation Process," *IEEE Transactions On Electron Devices*, vol. 61, hal. 2950-2956, Agu. 2014.
- [9] Junsheng Yu, Xinge Yu, Lin Zhang, Hongjuan Zeng, "Ammonia gas sensor based on pentacene organic field-effect transistor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 173, hal. 133-138, Agt. 2012.
- [10] Zheng-Tao Zhu, Jeffrey T. Mason, Rüdiger Dieckmann, dan George G. Malliaras, "Humidity sensors based on pentacene thin-film transistors," *Applied Physics Letters*, vol. 81, hal. 4643-4645, Des. 2002.
- [11] Hamid Farahani, Rahman Wagiran dan Mohd Nizar Hamidon, "Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review," *Sensors*, vol. 14, hal. 7881-7939, Apr. 2014.
- [12] Dawen Li, Evert-Jan Borkent, Robert Nortrup, Hyunsik Moon, Howard Katz, dan Zhenan Bao, "Humidity effect on electrical performance of organic thin-film transistors," *Applied Physics Letters*, vol. 86, hal. -, Jan. 2005.
- [13] Sukandar Sawidin, Olga Engelin Melo, Tracy Marsela, "Monitoring Kontrol Greenhouse untuk Budidaya Tanaman Bunga Krisan dengan LabView," *JNTETI*, vol. 4, Nov. 2015.
- [14] I Dewa Gede Rai M, "Rancang Bangun Robot Electronic Nose untuk mengidentifikasi Gas Menggunakan Multi Layer Perceptron," *JNTETI*, vol. 3, hal. 222-230, Agt. 2014.