

Г.І. БАРИЛО, Н.І. КУС, І.П. КРЕМЕР
Національний університет «Львівська політехніка»
В.В. ЛЕСІНСЬКИЙ, Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

СХЕМО-ТЕХНІЧНЕ РІШЕННЯ ІНТЕГРАЦІЇ ОРГАНІЧНОГО ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА В СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧІ СТРУКТУРИ

В роботі вивчаються вихідні та передавальні характеристики розроблених органічних польових тонкоплівкових транзисторів, в яких в якості каналного шару органічного напівпровідника використовувались плівки пентацену, а підзатворним діелектриком слугувала тонка плівка Al_2O_3 . На основі отриманих дослідних зразків транзисторів реалізовано драйвер керування трьохколірною світловипромінюючою органічною структурою.

Ключові слова: органічний польовий тонкоплівковий транзистор, підзатворний діелектрик, драйвер.

G.I. BARYLO, N.I. KUS, I.P. KREMER
Lviv Polytechnic National University
V.V. LESINSKY, L.F. POLITANSKY
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

SCHEME-TECHNICAL SOLUTION OF INTEGRATION OF ORGANIC FIELD-EFFECT TRANSISTOR INTO LIGHT-EMITTING STRUCTURES

The present paper is a study of source and transfer characteristics of the developed organic thin-film type field-effect transistors. Pentacene films were used as a channel layer of the organic semiconductor. Thin film Al_2O_3 was used as a gate dielectric. On the basis of the obtained research samples of transistors, there has been constructed a driver for controlling a three-colour light-emitting organic structure. The control driver for the three-color light-emitting organic structure was implemented in this article, which ensures the formation of certain voltage levels on two output channels, which allow forming the required spectral characteristic within the working range from 550 to 750 nm.

Keywords: organic thin-film type field-effect transistor, gate dielectric, driver.

Вступ

Комерційна привабливість органічних напівпровідників обумовлена дешевизною виготовлення та можливістю варіювання фізичними властивостями шляхом підбору методів хімічного синтезу і технологій формування активних складових [1–3]. Здатність інжектування носіїв заряду з електродів в дані матеріали уможлиблює виготовлення органічних польових тонкоплівкових транзисторів (ОПТТ). Проте, внаслідок малої рухливості носіїв струму в органічних транзисторах (на 4-5 порядки менше, ніж в кремнієвих транзисторах) діапазон їх робочих частот не перевищує 100 кГц [4–6]. Перевага ОПТТ полягає у технології формування ОПТТ, яка базується на низькотемпературних процесах та дозволяє їх формування на скляних, або гнучких підкладках, що обумовлює зниження їх собівартості при розширенні діапазону використання. На сьогодні існує загально визнана думка, що подальший розвиток органічної електроніки в недалекому майбутньому дозволить успішно впроваджувати різноманітні компоненти електронних пристроїв на основі органічних напівпровідників (в поєднанні з ОПТТ), в гібридних, як зокрема в сонячних батареях, світловипромінювальних діодах, сенсорах, актюаторах тощо [7, 8]. В даній роботі запропоноване схемо-технічне рішення інтеграції розроблених ОПТТ підзатворним діелектриком, в якому шар Al_2O_3 слугує органічними світловипромінювальними структурами.

Експериментальна частинна. Технологічні особливості виготовлення ОПТТ

На рис. 1 наведений переріз розробленого ОПТТ, виготовлення якого здійснюється за простим технологічним маршрутом. На першому етапі на поверхні високолегованої кремнієвої підкладки n -типу провідності методом термовакуумного нанесення формується тонка плівка Al , товщина якої становила $d_{Al} = 0,1$ мкм і контролювалася в процесі нанесення методом кварцевого резонатора [9]. Підзатворний діелектрик органічної транзисторної структури формувався електрохімічним анодуванням алюмінію з використанням електроліту, отриманого шляхом магнітного змішування лимонної кислоти високої ступені чистоти в дистильованій воді. Густина струму анодування становила $0,3$ мА/см² при напрузі 5 В. Товщина оксидного шару визначалась тривалістю процесу анодування, що становила 6 хв. Наступний етап полягав в покритті структури тонкою плівкою органічного напівпровідника (пентацена) методом термовакуумного нанесення. В якості каналного шару органічного напівпровідника використовувались плівки пентацену, що має більшу рухливість носіїв заряду в порівнянні з іншими органічними напівпровідниками [10]. В якості контактів стоку та витоку транзистора використовувалась плівка золота $d_{Au} = 0,1$ мкм, що отримувалась вакуумним методом нанесення через трафаретну маску. Довжина та ширина каналу становили 75 мкм та 10,08 мм відповідно.

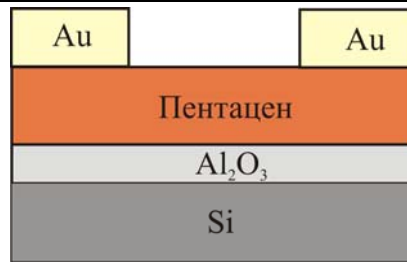


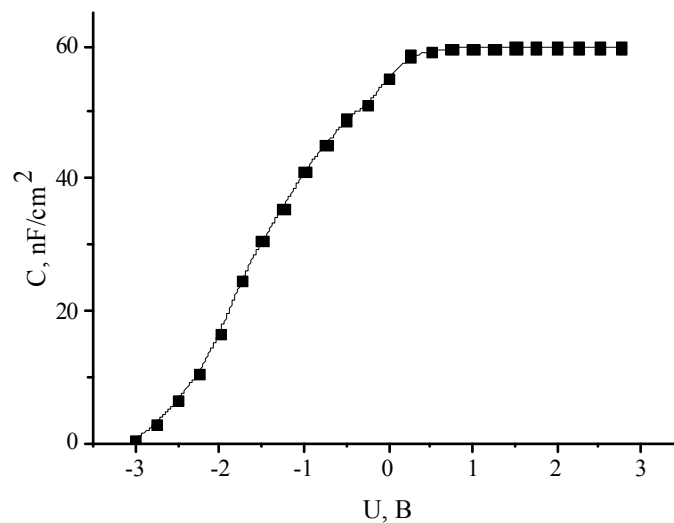
Рис. 1. Структура ОПТТ

Вимірювання характеристик ОПТТ проводилось на повітрі. Вихідні вольт-амперні характеристики отримані за допомогою напівпровідникового параметричного аналізатора (НР 4145А) з використанням вдосконаленої установки «ЗОНД», адаптованої для дослідження ОПТТ.

Дослідження основних властивостей підзатворного діелектрика

З метою визначення питомої ємності та відносної діелектричної проникливості плівки Al₂O₃ формували МДН структуру, де в якості контактів площею $S = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ слугувала вакуумно нанесена тонка плівка золота товщиною 1мкм. В якості підкладки структури слугували кремнієві підкладки КЭФ-4,5. Вольт-фарадні характеристики (ВФХ) МДН структури вимірювали приладом AUTOLAB з використанням програми GPES і FRA [9]. За отриманими значеннями уявної частини комплексного опору визначалась залежність ємності C структури Si-Al₂O₃-Au від напруги зміщення, що змінювалась в діапазоні від -3В до 3В (рис. 2).

При додатних зміщеннях в приповерхневому шарі Si накопичуються електрони. Приповерхневий шар в даному випадку можна розглядати як металеву пластину, а питому ємність МДН структури можна вважати рівною ємності діелектрика $C_1 = \epsilon \epsilon_0 S/d$ [11], де ϵ – діелектрична проникливість плівки Al₂O₃, S – площа золотих контактів. В режимі збіднення (від'ємне значення напруги зміщення) в МДН структурі домінує приповерхнева ємність Si [11].

Рис. 2. Залежність питомої ємності структури Si-Al₂O₃-Au від прикладеної напруги

Питома ємність діелектрика становить $59,74 \text{ нФ/см}^2$ при товщині оксиду Al₂O₃ $d_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0,1 \text{ мкм}$, тобто відносна діелектрична проникність оксиду становить 6,74. Висока діелектрична проникність Al₂O₃ плівки (для порівняння діелектрична проникність SiO₂ = 3,9) дає змогу формувати ОПТТ з відносно великою товщиною підзатворного оксиду зі збереженням крутизни транзистора.

Дослідження вихідних та передавальних характеристик ОПТТ

Вихідні ВАХ досліджуваних ОПТТ з довжиною каналу 75мкм приведені на рис. 3. Криві залежності струму стоку (I_d) від напруги стоку (V_{ds}) були отримані при зміні напруги на затворі (V_{gs}) з кроком 5В. Із отриманих залежностей випливає, що ОПТТ є p -канальним. У лінійному режимі, (коли V_{ds} значно менше напруги V_{gs}) та в режимі насичення (коли $V_{ds} > V_{gs} - V_T$ де V_T – порогова напруга), в першому наближенні струми стоку ($I_{d,lin}$ і $I_{d,sad}$) визначаються з формул (1) і (2) [5]

$$I_{d,lin} = W \mu C_1 (V_{gs} - V_T) V_{ds} / L \quad (1)$$

$$I_{d,sad} = W \mu C_i (V_{gs} - V_T)^2 / 2L \quad (2)$$

де μ – рухливість носії заряду, C – питома ємність діелектрика.

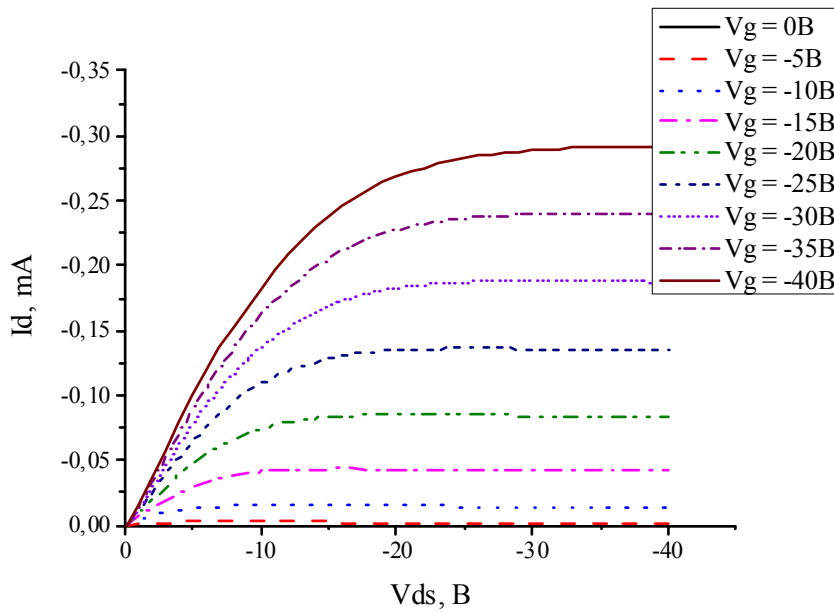


Рис. 3. Вихідні характеристики р-канального ОПТТ

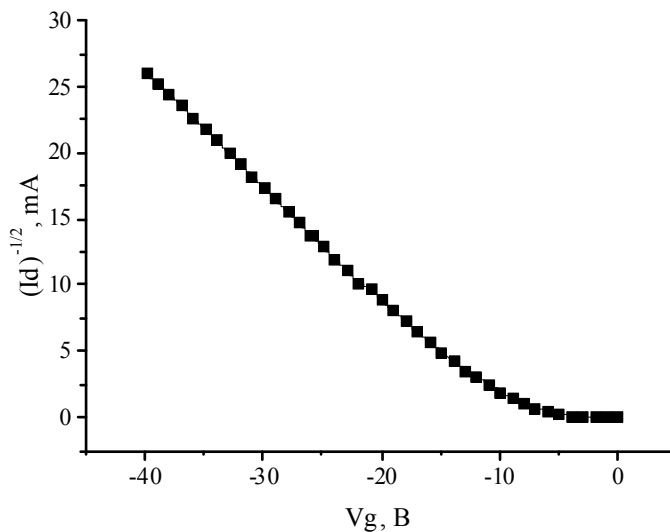


Рис. 4. Передавальні характеристики ОПТТ в лінійному режимі роботи

Із отриманої залежності струму стоку від напруги на затворі (при $V_{ds} = \text{const}$), зображеної на рис. 4, випливає, що порогова напруга ОПТТ становить $V_T = 8,1 \text{ В}$. Добре відомо, що рухливість в значній мірі залежить від природи і структурних недосконалостей підзатворного діелектрика. Пустоти та неоднорідності негативно впливають на носії заряду, це може бути причиною що приводить до низької ефективності ОПТТ. З метою встановлення досконалості Al_2O_3 підзатворного діелектрика в роботі також з'ясувались значення величин рухливості пентаценового ОПТТ з Al_2O_3 діелектриком та порівнювались зі значеннями рухливості з органічними транзисторами з SiO_2 діелектриком [10].

Із отриманих ВАХ було встановлено, що рухливість носіїв становить $0,12 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Порівнюючи дане значення зі значеннями рухливості органічного транзистор з SiO_2 діелектриком, що становить $1 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ [10], можна стверджувати про конкурентну здатність розробленого ОПТТ.

На основі отриманих дослідних зразків транзисторів реалізовано драйвер керування трьохколірною світловипромінюючою органічною структурою [9]. Драйвер забезпечує формування певних рівнів напруги по двох вихідних каналах, які дозволяють формувати необхідну спектральну характеристику в межах

робочого діапазону від 550 до 750 нм. Напруга живлення кожного з каналів U1 та U2 отримується шляхом комутації певних ключових транзисторів КЛ1-КЛ4 (рис. 5), керування якими здійснюється через відповідні дешифратори команд ДШ1, ДШ2.

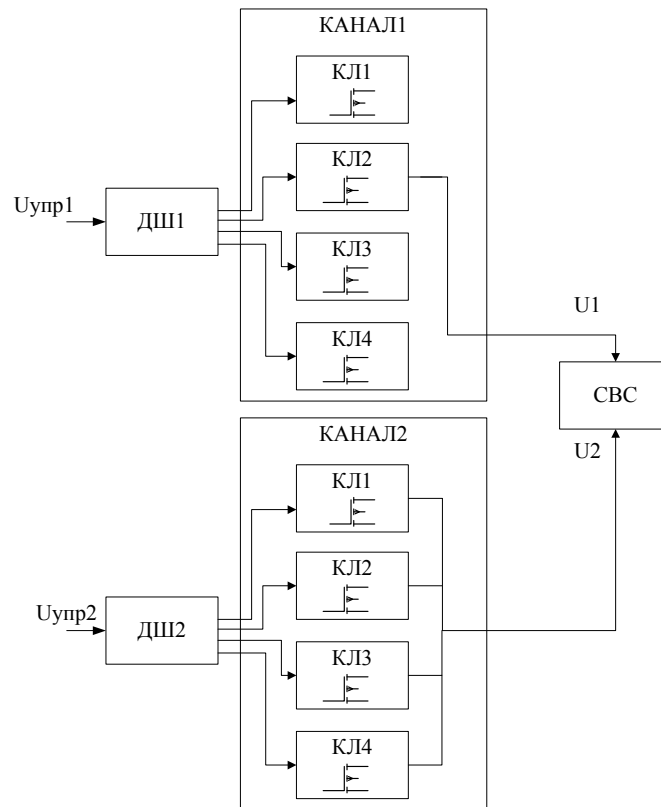


Рис. 5. Структурна схема драйвера світло випромінюючої структури на основі ОППТ

Відповідно до вхідного коду вмикаються певні ключі, які під'єднані через струмообмежувальні резистори до напруги живлення і на світлодіодну структуру подається відповідна напруга. Використання чотирьох транзисторних ключів дає можливість сформувати 16 градацій напруги керування в кожному з каналів і 256 градацій, відповідно, для керування всією структурою, яка забезпечує формування світлового випромінювання в межах робочого діапазону.

Розвиток запропонованого підходу побудови пристроїв керування на основі польових органічних транзисторів є перспективним з точки зору реалізації їх органічних світлових пристроїв у інтегральному виконанні.

Висновки

Порогова напруга органічного *p*-канального плівкового транзистора становить 8,1В. Рухливість носіїв в каналній області відповідає значенню $0,12 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Реалізовано драйвер керування трьохколірною світловипромінюючою органічною структурою, що забезпечує формування певних рівнів напруги по двох вихідних каналах, які дозволяють формувати необхідну спектральну характеристику в межах робочого діапазону від 550 до 750 нм.

Література

1. Готра З.Ю. Органічні нанорозмірні світловипромінювальні структури на основі низькомолекулярних матеріалів / З.Ю. Готра, Д.Ю. Волинюк. – Львів : Львівської політехніки, 2013. – 204 с.
2. Burroughes J.H., Bradley D.D.C., Brown A.R., Marks R.N., Mackay K., Friend R.H., Burn P.L., Holmes A.B. Light-emitting diodes based on conjugated polymers // *Nature*. – 1990. – № 347. – P. 539–541.
3. Goetzberger A., Hebling C., Schock H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook // *Mater. Sci. Eng.* – 2003. – R40. – P. 1–46.
4. Hiroshiba N., Hayakawa R., Chikyow T., Matsuishi K., Wakayama Y. Ambipolar carrier transport in hetero-layered organic transistors consisting of quaterylene and N,N'-dioctyl-3,4,9, 10-perylenedicarboximide // *Organic Electronics*. – 2011. – № 12. – P. 1336–1340.
5. Oh J. H., Liu S., Bao Z., Schmidt R., Würthner F. Air-stable n-channel organic thin-film transistors with high field-effect mobility based on N,N'-bis(heptafluorobutyl)-3,4:9,10-perylene diimide // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – № 91. – P. 212107.
6. Gudeika D., Grazulevicius J. V., Sini G., Bucinskas A., Jankauskas V., Miasojedovas A., Jursenas S.

New derivatives of triphenylamine and naphthalimide as ambipolar organic semiconductors: Experimental and theoretical approach // *Dyes and Pigments*. – 2014. – № 106. – P. 58–70.

7. Peumans P., Yakimov A., Forrest S.R. Small molecularweight organic thin-film photodetectors and solar cells // *J. Appl. Phys.* – 2003. – № 93. – P. 3693/

8. Hotra Z., Volyniuk D., Cherpak V., Stakhira P., Grygorchak I., Grazulevicius J., Michaleviciute A., Tomkeviciene A., Barylo G., Kus N., Hladun M. Electro-acoustic effect in organic structure based on star-shaped cabrazole derivatives // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2014. – № 589. – P. 67–73.

9. Voznyak L., Grazulevicius J. V., Cherpak V., Stakhira P., Minaev B., Baryshnikov G., Stromylo E., Helzhynskyy I., Chapran M., Volyniuk D., Hotra Z., Dabulienė A., Tomkeviciene A. Mixing of phosphorescent and exciplex emission in efficient organic electroluminescent devices // *Applied Materials & Interfaces*. – 2015. – № 7. – P. 1219–1225.

10. Klauk H., Halik M., Zschieschang U., Radlik W. High-mobility polymer gate dielectric pentacene thin film transistors // *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*. – 2002. – № 92. – P. 5263.

11. Зи М.С. Физика полупроводниковых приборов / М.С. Зи. – М. : Энергия, 1972. – 655 с.

References

1. Hotra Z.Yu. Orhanichni nanorozmirmi svitlovyprominiuvalni struktury na osnovi nyzkomolekuliarnykh materialiv / Z.Yu. Hotra, D.Yu. Volyniuk. – Lviv : Lvivskoi politekhniki, 2013. – 204 с.

2. Burroughes J.H., Bradley D.D.C., Brown A.R., Marks R.N., Mackay K., Friend R.H., Burn P.L., Holmes A.B. Light-emitting diodes based on conjugated polymers // *Nature*. – 1990. – № 347. – P. 539–541.

3. Goetzberger A., Hebling C., Schock H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook // *Mater. Sci. Eng.* – 2003. – R40. – P. 1–46.

4. Hiroshiba N., Hayakawa R., Chikow T., Matsuishi K., Wakayama Y. Ambipolar carrier transport in hetero-layered organic transistors consisting of quaterylene and N,N0-dioctyl-3,4,9, 10-perylenedicarboximide // *Organic Electronics*. – 2011. – № 12. – P. 1336–1340.

5. Oh J. H., Liu S., Bao Z., Schmidt R., Würthner F. Air-stable n-channel organic thin-film transistors with high field-effect mobility based on N,N'-bis(heptafluorobutyl)-3,4:9,10-perylene diimide // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – № 91. – P. 212107.

6. Gudeika D., Grazulevicius J. V., Sini G., Bucinskas A., Jankauskas V., Miasojedovas A., Jursenas S. New derivatives of triphenylamine and naphthalimide as ambipolar organic semiconductors: Experimental and theoretical approach // *Dyes and Pigments*. – 2014. – № 106. – P. 58–70.

7. Peumans P., Yakimov A., Forrest S.R. Small molecularweight organic thin-film photodetectors and solar cells // *J. Appl. Phys.* – 2003. – № 93. – P. 3693

8. Hotra Z., Volyniuk D., Cherpak V., Stakhira P., Grygorchak I., Grazulevicius J., Michaleviciute A., Tomkeviciene A., Barylo G., Kus N., Hladun M. Electro-acoustic effect in organic structure based on star-shaped cabrazole derivatives // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2014. – № 589. – P. 67 – 73.

9. Voznyak L., Grazulevicius J. V., Cherpak V., Stakhira P., Minaev B., Baryshnikov G., Stromylo E., Helzhynskyy I., Chapran M., Volyniuk D., Hotra Z., Dabulienė A., Tomkeviciene A. Mixing of phosphorescent and exciplex emission in efficient organic electroluminescent devices // *Applied Materials & Interfaces*. – 2015. – № 7. – P. 1219–1225

10. Klauk H., Halik M., Zschieschang U., Radlik W. High-mobility polymer gate dielectric pentacene thin film transistors // *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*. – 2002. – № 92. – P. 5263.

11. Zy M.S. Fyzyka poluprovodnykovykh pryborov / M.S. Zy. – М. : Enerhyia, 1972. – 655 с.

Рецензія/Peer review : 06.06.2017 р.

Надрукована/Printed :05.09.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Шайко-Шайковський О.Г.