

Эффективный источник УФ излучения на основе бесферритного индукционного ртутного разряда в замкнутой трубке малого диаметра

П.В. СТАРШИНОВ¹, О.А. ПОПОВ¹, Р.А. ИЛИКЕЕВА¹, Д.А. БУРЕЕВА¹,
И.В. ИРХИН², В.А. ЛЕВЧЕНКО³, Г.П. ТЕРЕХОВ¹

НИУ «МЭИ»¹, ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»², НПО «ЛИТ»³, Москва
E-mail: popovoleg445@yahoo.com

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование характеристик бесферритных индукционных разрядов в лампах, образованных замкнутой кварцевой трубкой с длиной 815 мм и внутренним диаметром 16,6 мм. Разряд поддерживался при частоте 1,7 МГц и мощности плазмы разряда 90–60 Вт в смеси паров ртути ($7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) с Ar (0,7 и 1,0 мм рт. ст.) или со смесью 30 % Ne + 70 % Ar (0,7 и 1,0 мм рт. ст.). Выполненная из литцендрата с низким удельным погонным сопротивлением ($1,4 \cdot 10^{-4}$ Ом/см) 3-витковая катушка индуктивности размещалась по внешнему периметру разрядной трубки. В лампах с давлением инертных газов 1,0 мм рт. ст. повышение мощности лампы с 95 до 150 Вт сопровождалось снижением мощности потерь в проводе катушки индуктивности с 7 до 3–4 Вт и повышением энергетического КПД лампы в резонансной линии ртути 254 нм с 57 до 66 %. Снижение давлений и Ar, и Ne-Ar смеси с 1,0 до 0,7 мм рт. ст. снижало этот показатель на 10–20 %.

Ключевые слова: индукционный разряд, замкнутая разрядная трубка, ртутная плазма НД, мощность потерь, УФ резонансное излучение.

Введение

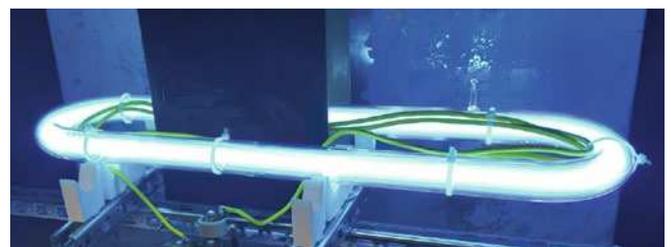
Безэлектродные индукционные лампы на смесях паров ртути НД (давление около 1 мм рт. ст.) и инертных газов (ИГ) – перспективные источники УФ резонансного излучения на λ 185 и 254 нм, используемого в бактерицидных лампах [1, 2]. Благодаря отсутствию внутренних электродов они имеют высокий срок службы и могут работать при низких давлениях ИГ (0,1–1,0 мм рт. ст.), соответствующих, в частности, максимальным

значениям энергетического КПД лампы в резонансной линии ртути 254 нм $\eta_{e, 254}$, определяемого отношением потока излучения лампы в этой линии $\Phi_{e, 254}$ к мощности лампы P_{lamp} [3–5]. Это делает безэлектродные индукционные УФ лампы НД конкурентами электродных ртутных УФ ламп, работающих при более высоких давлениях ИГ (2–3 мм рт. ст.) [6].

Особый интерес представляют бесферритные индукционные лампы УФ излучения, в которых ртутная плазма возбуждается в замкнутой разрядной трубке с помощью катушки индуктивности, размещённой по периметру этой трубки [7, 8]. В недавних экспериментальных исследованиях этого вида ламп с кварцевыми трубками внутреннего диаметра d_t 16,6 и 25 мм, работающих на частоте f 1,7 МГц при равной 0,8–1,2 Вт/см удельной мощности плазмы разряда P_1 , выражаемой отношением P_{pl}/A_{pl} , где P_{pl} – мощность плазмы разряда, а A_{pl} – длина замкнутого плазменного витка, были получены высокие значения (63–65 %) отношения $\Phi_{e, 254}/P_{pl}$ [9, 10]¹, которые больше, чем у электродных УФ ламп НД [6], индукционных бесферритных линейных УФ ламп НД, работающих на f 1–4 МГц [5], и УФ ламп НД трансформаторного типа, работающих на f 265 кГц [3, 4].

¹ Это отношение в статьях [3–5, 9, 10] ошибочно интерпретируется как энергетический КПД плазмы разряда в линии ртути 254 нм. – Прим. ред.

Рис. 1. Фотография бесферритной индукционной ртутной лампы НД



Однако из-за большой (40–45 Вт) мощности потерь в проводе катушки индуктивности P_{coil} – вследствие высокого удельного погонного сопротивления ρ_w одножильного медного провода ($8 \cdot 10^{-4}$ Ом/см) – КПД этой катушки η_{coil} , определяемый как $1 - P_{coil}/P_{lamp}$, не превышал 80 %, а $\eta_{e, 254}$ – 50 % [9, 10]. Очевидно, для существенного повышения η_{coil} (до 95–97 %) в бесферритных индукционных лампах можно использовать катушки индуктивности из провода с малым ρ_w ($< 2 \cdot 10^{-4}$ Ом/см), каковым при $f = 0,2$ – $2,0$ МГц является многожильный (19–140 жил) медный провод (литцендрат).

Большой практический интерес представляет исследование возможности создания высокоэффективных бесферритных индукционных амальгамных разрядных УФ ламп НД с замкнутой трубкой с d_t 16,6 мм, способных заменять электродные УФ лампы НД с разрядной трубкой того же диаметра [6].

Экспериментальная установка и методики измерений

Индукционный разряд зажигался на частоте f 1,7 МГц в лампе, образованной замкнутой кварцевой трубкой со стенкой толщиной 1,2 мм, с d_t 16,6 мм и A_{pl} 815 мм (рис 1). Лампа имела вид вытянутого кольца длиной 375 мм с расстоянием между длинными параллельными участками разрядной трубки 82 мм. ВЧ индуктором служила 3-витковая катушка индуктивности из литцендрата с ρ_w $1,4 \cdot 10^{-4}$ Ом/см и диаметром d_w 1,5 мм, размещённой по внешнему периметру лампы (рис. 1). Давление паров ртути поддерживалось по максимуму $\Phi_{e, 254}$ температурой ртутно-индиевой амальгамы, помещённой на внутренней поверхности разрядной трубки. В качестве буферных газов использовались Ar и смесь 30 % Ne + 70 % Ar с давлением 0,7 и 1,0 мм рт. ст.

Измерения проводились при мощности комплекта P_k , включающей в себя P_{lamp} и мощность потерь в ВЧ

Рис. 2. Зависимость P_{coil} от P_{lamp} . (1 Торр = 1 мм рт. ст.)

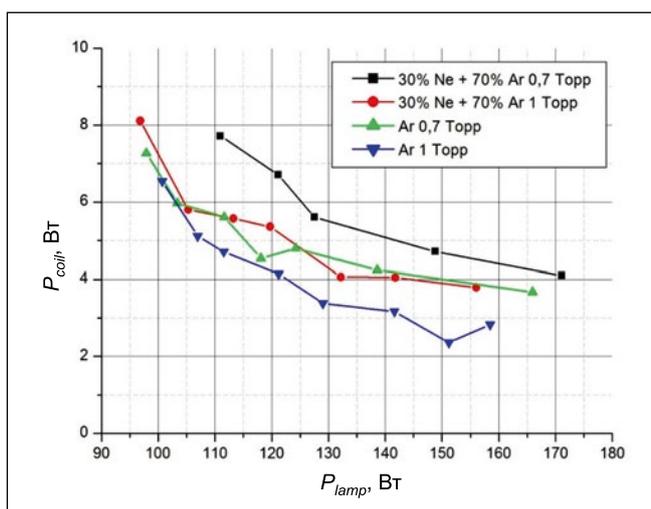
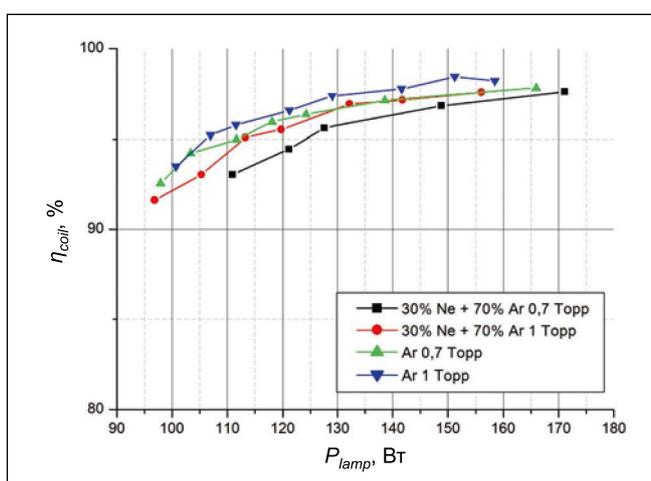


Рис. 3. Зависимость η_{coil} от P_{lamp}



генераторе P_{gen} , равной 107–190 Вт. (При $f < 10$ МГц мощность электромагнитного излучения, рассеиваемая катушкой, ничтожно мала [7], и потому $P_{\text{lamp}} = P_{\text{pl}} + P_{\text{coil}}$.) КПД работавшего на $f = 1,7$ МГц генератора мощности η_{gen} , определяемый как $\eta_{\text{gen}} = 1 - P_{\text{gen}}/P_k$, составлял 0,9, а P_{coil} находилась методом замещения в отсутствие в лампе разряда [4, 7].

Лампа размещалась в чёрном заземлённом металлическом коробе. Измерения $\Phi_{e, 254}$ проводились с помощью УФ датчика IS-4, расположенного вплотную к поверхности колбы. Датчик предварительно калибровался по эталонной лампе с известным $\Phi_{e, 254}$, контролируемым по модернизированной схеме измерения Кайтца [3].

Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости P_{coil} от P_{lamp} , полученные в индукционных лампах с двумя разными наполнениями и их

давлениями. Видно, что: P_{coil} снижается с 7–8 Вт (P_{lamp} 95 Вт) до 3–4 Вт (P_{lamp} 140–150 Вт), а при больших P_{lamp} практически не меняется; снижение давления и добавление к Ar более лёгкого Ne повышает, хоть и незначительно, P_{coil} . С практической точки зрения необходимо отметить, что у катушки из литцендрата P_{coil} значительно ниже, чем у катушки из медного провода с тем же d_w (1,5 мм) в лампе с теми же конструктивными параметрами [10].

Малость P_{coil} обусловила высокий η_{coil} , возрастающий с повышением P_{lamp} с 92 % (P_{lamp} 96 Вт) до 97–98 % (P_{lamp} 160 Вт) (рис. 3), что на 25–30 % выше, чем у катушки индуктивности из медного провода с тем же d_w , использовавшейся в индукционной бесферритной лампе с разрядной трубкой с d_t 16,6 мм, работающей на f 1,7 МГц при тех же уровнях P_{lamp} [10].

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости $\Phi_{e, 254}$ от P_{lamp} для смесей паров ртути с Ar и со смесью 30 % Ne+70 % Ar с давления-

ми по 0,7 и 1,0 мм рт. ст. Видно, что при давлении ИГ 1,0 мм рт. ст. $\Phi_{e, 254}$ возрастает с ростом P_{lamp} с 55 Вт (P_{lamp} 95 Вт) до 102 Вт (P_{lamp} 160 Вт) и превосходит по уровню на 10–20 % $\Phi_{e, 254}$ при давлении ИГ 0,7 мм рт. ст. (Попутно заметим, что в безэлектродных индукционных ртутных ЛЛ максимумы зависимостей $\Phi_{e, 254}$ и светового потока лампы от давления ИГ с уменьшением d_t и P_{pl} смещаются вправо [11].)

Из рис. 5 видно, что максимальное значение $\eta_{e, 254}$ (64–66 %) при давлении ИГ 1,0 мм рт. ст. достигается при $P_{\text{lamp}} = 120$ –160 Вт ($P_1 = 1,5$ –2,0 Вт/см). Оно значительно выше, чем у индукционных ламп с такими же конструктивными параметрами разрядной трубки, но с катушкой индуктивности из медного провода с большим ρ_w ($8 \cdot 10^{-4}$ Ом/см) [9, 10]. С практической стороны весьма важно, что $\eta_{e, 254}$ у ламп с катушкой индуктивности из литцендрата на 30–40 % выше, чем у УФ трубчатых ламп с внутренними электродами и d_t 16,6 мм, работающих при тех же уровнях P_{lamp} , но при более высоких (3–4 мм рт. ст.) давлениях ИГ [6].

«Разбавление» аргона неонem практически не влияет на $\eta_{e, 254}$ УФ индукционных ламп с давлением ИГ 1,0 мм рт. ст. Небольшое повышение $\eta_{e, 254}$ в случае смеси Ar с Ne с меньшим давлением, 0,7 мм рт. ст., возможно, связано с большей напряжённостью ВЧ электрического поля и, следовательно, большей электронной температурой плазмы индукционного разряда лампы.

Стоит заметить, что на уровень $\Phi_{e, 254}$ дополнительно влияют оптические потери как в самой замкнутой разрядной трубке, так и вследствие её самоэкранирования, а также из-за экранирующего действия катушки индуктивности. В частности, поэтому для повышения $\Phi_{e, 254}$ и, соответственно, $\eta_{e, 254}$ следует стремиться к уменьшению числа витков катушки N и (или) d_w .

В то же время для сохранения высокой добротности катушки и малости P_{coil} уменьшение N должно сопровождаться повышением f ВЧ электрического поля [12], что без «пропорционального» снижения плотности плазмы может приводить к скин-эффекту, «выталкивающему» ВЧ электрическое поле к стенкам разрядной трубки и повышающему среднюю по сечению плазмы напряжённость поля

Рис. 4. Зависимость $\Phi_{e, 254}$ от P_{lamp}

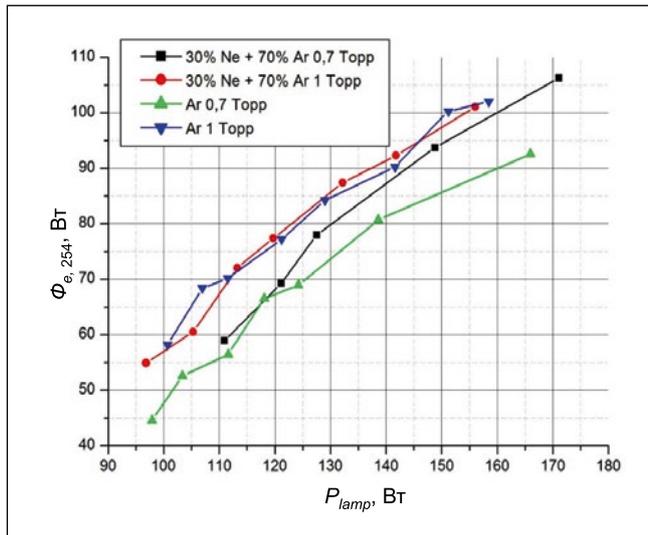
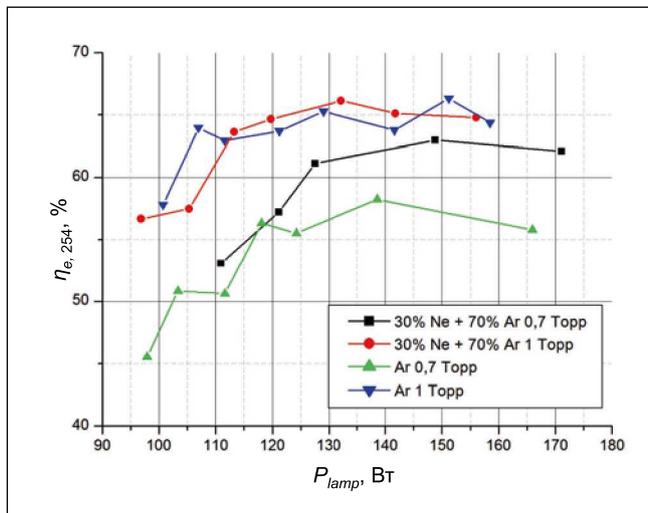


Рис. 5. Зависимость $\eta_{e, 254}$ от P_{lamp}



\bar{E}_{pl} [13–16]. В этом случае возрастает электронная температура, а с ней растут и $\Phi_{e, 254}$ и $\eta_{e, 254}$ [9, 10]. Однако $\eta_{e, 254}$ из-за роста P_{coil} , пропорциональной квадрату этой напряженности, может расти слабо или даже падать [9, 10, 17].

Заключение

– Благодаря применению многожильного провода (литцендрат) с малым ρ_w ($1,4 \cdot 10^{-4}$ Ом/см) P_{coil} в исследованном интервале значений P_{lamp} 90–150 Вт стала низкой (3–7 Вт), а η_{coil} намного возрос (92–98 %).

– Значения $\eta_{e, 254}$ достигли 62–66 %, что выше, чем у бесферритных индукционных ламп с замкнутыми разрядными трубками того же диаметра, но с катушкой индуктивности из одножильного провода [9, 10], и значительно выше, чем у ртутных УФ ламп НД, работающих на более низких f (20–80 кГц) [6].

– Добавление *Ne* (30 %) к *Ar* заметного повышения $\eta_{e, 254}$ не даёт, а повышение давления ИГ с 0,7 до 1,0 мм рт. ст. увеличивает $\eta_{e, 254}$ на 15–20 %.

– Для снижения экранирующего действия витков катушки индуктивности рекомендуется уменьшать d_w и N (с соответственным повышением f электрического поля).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исупов М.В., Кротов С.В., Литвинцев А.Ю., Уланов И.М. Индукционная ультрафиолетовая лампа // Светотехника. – 2007. – № 5. – С. 37–40.
2. Kobayashi S., Hatano A. High-intensity low-pressure electrodeless mercury-argon lamp for UV disinfection of wastewater // Journal of Water and Environment Technology. – 2005. – Vol. 3., No.1. – P. 71–76.
3. Левченко В.А., Попов О.А., Свитнев С.А., Старшинов П.В. Экспериментальные исследования электрических и оптических характеристик безэлектродной УФ лампы трансформаторного типа // Светотехника. – 2014. – № 6. – С. 39–43.

4. Левченко В.А., Попов О.А., Свитнев С.А., Старшинов П.В. Электрические и излучательные характеристики лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 16,6 мм // Светотехника. – 2016. – № 1. – С. 41–44.

5. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В. Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Часть 2. Излучательные характеристики плазмы // Успехи прикладной физики. – 2016. – № 4. – С. 372–384.

6. Ультрафиолетовые технологии в современном мире: Коллективная монография / Под ред. Ф.В. Кармазинова, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцева, С.В. Храменкова. – Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект», 2012. – 392 с.

7. Popov O.A., Chandler R.T. Ferrite-free high power electrodeless fluorescent lamp operated at a frequency of 160–1000 kHz // Plasma Sources Science and Technology. – 2002. – Vol. 11. – P. 218–227.

8. Попов О.А., Никифорова В.А. Индукционный бесферритный источник света мощностью 300–400 Вт на частоте 200–400 кГц // Вестник МЭИ. – 2010. – № 2. – С. 159–164.

9. Старшинов П.В., Попов О.А., Ирхин И.В., Левченко В.А., Васина В.Н. Индукционная УФ лампа на основе ртутного разряда НД в замкнутой бесферритной трубке // Светотехника. – 2019. – № 2. – С. 44–46.

10. Старшинов П.В., Попов О.А., Ирхин И.В., Васина В.Н., Левченко В.А. Электрические и излучательные характеристики индуктивных бесферритных ртутных УФ ламп в замкнутых трубках // Вестник МЭИ. – 2019. – № 3. – С. 87–97.

11. Попов О.А. Исследование влияния давления инертного газа на характеристики индукционных люминесцентных ламп // Вестник МЭИ. – 2013. – № 3. – С. 76–84.

12. Ловля Е.В., Попов О.А. Мощность потерь в индукторе бесферритных индукционных ртутных ламп НД с замкнутой разрядной трубкой // Светотехника. – 2019. – № 6. (Принята к публикации.)

13. Раизер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. – 592 с.

14. Hyo-Chang Lee, Seung Ju Oh, Chin-Wookn Chung. Experimental observation of the skin effect on plasma uniformity in inductively coupled plasmas with a radio frequency bias // Plasma Sources Sci. Technol. – 2012. – Vol. 21, No. 3.

15. Никифорова В.А., Попов О.А. Влияние частоты ВЧ поля и разрядного тока на радиальное распределение параметров плазмы индукционного бесферритного разряда в замкнутой трубке // Вестник МЭИ. – 2012. – № 1. – С. 108–114.

16. Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б. Исследование параметров плазмы индуктивного ВЧ-источника плазмы диаметром 46 см. Ч.1. Параметры плазмы в области скин-слоя // Прикладная физика. – 2013. – № 5. – С. 34–37.

17. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В. Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Часть 1. Электрические характеристики ВЧ индуктора // Успехи прикладной физики. – 2016. – № 2. – С. 139–149.



Старшинов Павел Валерьевич, магистр техн. наук. Окончил в 2015 г. кафедру «Светотехника» НИУ «МЭИ». Аспирант этой кафедры



Попов Олег Алексеевич, доктор техн. наук. Окончил в 1965 г. МЭИ. Профессор кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ»



Иликеева Римма Анваровна, аспирант кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ»



Буреева Дарья Александровна, студент кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ»



Ирхин Игорь Вячеславович, кандидат техн. наук. Ведущий научный сотрудник ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»



Левченко Владимир Александрович, кандидат физ.-мат. наук. Окончил МФТИ. Зам. заведующего лабораторией НПО «ЛИТ»



Терехов Геннадий Петрович, ассистент кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ»

Вышел отчёт МКО CIE 237:2020 *Non-Linearity of Optical Detector Systems* («Нелинейность оптических детекторных систем»)

В новом техническом отчёте МКО содержатся рекомендации по определению характеристик, выбору и применению детекторов оптического излучения для выполнения линейных условий измерения. Это помогает пользователям определять причины нелинейного поведения и избегать нелинейной работы. В отчёте рассматриваются рабочие схемы детектора, условия измерения, измерения сигнала детектора в различных режимах и измерения предусилителя. Показано, как создать систему детекторов, которая минимизирует погрешности измерений, вызванные нелинейной работой. Кроме того, в документе описываются методы проведения испытания нелинейности, с помощью которых мож-

но определить линейность детекторов и их рабочих цепей.

Документ на 35 страницах издан на английском языке, с кратким изложением на французском и немецком языках и доступен для покупки в интернет-магазине МКО.

Ближайшие мероприятия МКО 5-й Экспертный Симпозиум по цвету и визуализации – 20–24 апреля 2020 года, Гонконг

Семинар МКО по расчёту и изменению световых помех – 21–22 мая 2020, Острава, Чешская Республика. Семинар будет проходить на факультете электротехники и информатики Технического университета Остравы. Предварительная программа и вся необходимая информация доступны на сайте МКО – www.cie.co.at

Пресс-релиз Международной комиссии по освещению (МКО) за январь 2020 года

Новые исследования по крупногабаритным гибким диодам ближнего ИК излучения

Исследователи из Национального университета Сингапура под руководством проф. Тан Чжи-Куана (*Tan Zhi Kuang*) разработали высокоэффективные большие по площади, 900 мм², гибкие диоды ближнего ИК диапазона для технически новых носимых устройств с использованием недорогих методов мокрого осаждения.

Эти диоды значительно больше описанных в других сообщениях и открывают целый ряд новых применений. В них используется новый прямозонный полупроводник на основе перовскита, способный к сильному излучению. Используя новую архитектуру диода, исследователи способны настраивать инжекцию электронов и дырок в перовскит, с тем чтобы сбалансированное число противоположных зарядов встречалось и вызывало эффективную генерацию света. Учёные также обнаружили, что это усовершенствование позволяет изготавливать диоды большой площади со значительно более высокой воспроизводимостью.

При этом эффективность инжекции дырок существенно влияет на работу диода. Использование органического полупроводника с более низким потенциалом ионизации в качестве части структуры диода инжекцию дырок и зарядовое равновесие может улучшать. В результате диоды могут излучать с эффективностью (внешняя квантовая эффективность 20%), близкой к теоретическому пределу, и, кроме того, иметь уменьшенный разброс характеристик от изделия к из-



делию, позволяющий создавать гораздо более крупные ИК диоды.

Проф. Тан Чжи-Куан сказал: «Некоторые из технологий, которым наше устройство могло бы дать жизнь, – скрытое (визуально невидимое) облучение в технологиях распознавания лиц или отслеживания взгляда в системах дополненной/виртуальной реальности. В частности, мы продемонстрировали, что наши ИК диоды подходят для чрескожного облучения (освещения) глубоких тканей, например, в носимых устройствах слежения за здоровьем».

На рис. А демонстрируется равномерность свечения перовскитного диода, а на рис. В – визуализацию с его помощью подкожных кровеносных сосудов на кулаке.

Полное описание данного исследования см. на сайте журнала «*Nature Photonics*» (02.12.2019).

ledinside.com
30.12.2019