

## Характеристики многоволновой УФ – ВУФ лампы на смеси аргона, криптона и паров фреона с накачкой наносекундным барьерным разрядом

А.К.Шуаибов, А.И.Миня, Р.В.Грицак, З.Т.Гомоки

*Приведены результаты исследования характеристик многоволновой лампы на основе газовой смеси Ar–Kr–CCl<sub>4</sub> с накачкой наносекундным барьерным разрядом, излучающей в спектральном диапазоне 170–260 нм. Основными в спектре излучения лампы были полосы ArCl (B → X) вблизи 175 нм, KrCl (B → X) вблизи 222 нм и Cl<sub>2</sub> (D' → A') вблизи 258 нм. Проведена оптимизация интенсивности лампы по давлению и составу рабочих смесей, а также режима накачки.*

**Ключевые слова:** барьерный разряд, лампа, хлориды аргона и криптона, молекулы фреона и хлора, интенсивность излучения.

Освоение ближнего ВУФ участка спектра (160–190 нм) из всего бактерицидного диапазона длин волн (160–280 нм) можно осуществить путем разработки излучающей одновременно на нескольких длинах волн (многоволновой) лампы на основе полос хлоридов аргона и криптона: ArCl (B → X) с  $\lambda \approx 175$  нм и KrCl (B → X) с  $\lambda \approx 222$  нм [1]. Результаты исследования характеристик излучателей на основе ArCl (B → X) с накачкой импульсным объемным разрядом представлены в работах [2, 3]. Излучение ВУФ полосы хлорида аргона, как правило, сопровождается излучением полосы D' → A' молекулы хлора вблизи  $\lambda = 258$  нм, которая близка к длине волны резонансной спектральной линии атома ртути (253 нм), широко используемой в различных оптических технологиях, базирующихся на применении ртутных ламп. Перспективность использования лампы, излучающей вблизи  $\lambda = 258$  нм, по сравнению со ртутными лампами низкого давления ( $\lambda = 253$  нм) при бактерицидных применениях связана с полным совпадением основного максимума поглощения молекулы ДНК именно с полосой хлора, а не с резонансной спектральной линией атома ртути. Рабочая среда излучателей на основе хлорида аргона и хлора значительно дешевле, чем у эксимерных ксеноновых ламп ( $\lambda \approx 172$  нм).

Эксплексные лампы с накачкой объемным разрядом излучали полосы ArCl (B → X) с  $\lambda \approx 175$  нм и Cl<sub>2</sub> (D' → A') с  $\lambda \approx 258$  нм при пиковой интенсивности излучения до 0.4 кВт/см<sup>2</sup>. Однако ресурс работы подобных излучателей на одной рабочей смеси был меньше нескольких десятков часов. Другим их недостатком является небольшая рабочая апертура излучателя.

В работе [4] приводятся результаты исследования характеристик многоволновых УФ ламп на смесях Ar–Kr–Cl<sub>2</sub> и Ar–Kr–Br<sub>2</sub> с накачкой импульсным барьерным разрядом. Однако в этих экспериментах ВУФ излучение по-

лос ArCl (B → X) и ArBr (B → X) не исследовалось, что может привести к заниженной оценке эффективности и мощности излучения таких многоволновых излучателей.

Излучение полосы молекулы KrCl наблюдалось в экспериментах с использованием одно- и двухбарьерных ламп наносекундной длительности [5]. Пиковая интенсивность излучения ламп составляла 0.5 кВт/см<sup>2</sup> при длительности импульса 4 нс. В отличие от работы [5], в [6] исследовалась KrCl-эксиллампа, которая возбуждалась барьерным разрядом субмикросекундной длительности при частоте  $f = 50$  Гц (мощность излучения лампы составляла более 100 кВт при КПД до 10%).

Для увеличения импульсной мощности излучения и ресурса работы многоволновой лампы, перспективной для применения в фотохимии, фотомедицине и экологии, в работе [7] был использован импульсно-периодический барьерный разряд наносекундной длительности, который зажигался в смеси Ar–CCl<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O. Эта лампа излучала полосы с  $\lambda \approx 175$  и 258 нм, а также полосу OH (A → X) с  $\lambda \approx 308$  нм с соизмеримыми интенсивностями.

Для более равномерного перекрытия бактерицидного диапазона длин волн, увеличения мощности излучения и селективного воздействия на отдельные биомолекулы необходимы мощные УФ–ВУФ излучатели с возможностью перестройки их спектра излучения и достаточно большим ресурсом работы в газостатическом режиме, рабочей средой для которых могут быть смеси Kr–Ar–CCl<sub>4</sub>. Однако выходные характеристики таких многоволновых ламп с накачкой высоковольтным барьерным разрядом наносекундной длительности практически не исследованы.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования характеристик УФ–ВУФ лампы на смеси Ar–Kr–CCl<sub>4</sub> с накачкой наносекундным барьерным разрядом.

Высоковольтный наносекундный разряд с двумя барьерами из кварца зажигался в цилиндрической колбе из кварца марки КУ-1. Рабочая длина колбы многоволнового УФ–ВУФ излучателя составляла 20 см при диаметре внутренней трубки из кварца 14 мм. Расстояние между внутренним и внешним барьерами равнялось ~4.5 мм. Внутренний электрод лампы был изготовлен в виде сплошного цилиндра из алюминия и устанавливался во

А.К.Шуаибов, А.И.Миня, Р.В.Грицак, З.Т.Гомоки. Ужгородский национальный университет, Украина, 88000 Ужгород, ул. Подгорная, 46; e-mail: roksolanija@ukr.net

Поступила в редакцию 5 марта 2014 г., после доработки – 27 апреля 2014 г.

внутреннюю кварцевую трубку. Внешним электродом служила спираль из никелевого провода с прозрачностью 80%. Площадь рабочей поверхности излучателя составила 360 см<sup>2</sup>.

Импульсный барьерный разряд зажигался в безфиламентном режиме с помощью источника импульсов высокого напряжения с резонансной перезарядкой накопительной импульсной емкости, изготовленной из конденсаторов КВИ-3. Суммарная емкость модулятора составляла 1.54 нФ, а в качестве коммутатора использовался водородный тиратрон ТГИ-1-1000/25. Амплитуда импульсов напряжения на выходе модулятора увеличивалась импульсным кабельным трансформатором примерно в три раза и достигала 40–50 кВ при длительности отдельного выброса напряжения ~20 нс. Амплитуда основного максимума импульса тока достигала 50 А при его длительности 20–30 нс. Частота следования импульсов напряжения могла изменяться в диапазоне 35–1000 Гц. Импульсы тока и напряжения регистрировались с использованием пояса Роговского, малоиндуктивного делителя напряжения и скоростного импульсного осциллографа 6-ЛОР. Измерение абсолютной мощности излучения лампы проводилось с помощью прибора «Кварц-01».

Излучение плазмы анализировалось в спектральном диапазоне 140–310 нм с использованием вакуумного монохроматора и фотоумножителя ФЭУ-142 с окном из фторида лития. На рис.1 представлен спектр излучения многоволновой УФ–ВУФ лампы на смеси аргона, криптона и паров CCl<sub>4</sub>. Излучение лампы перекрывает спектральный диапазон 170–260 нм и состоит из наиболее интенсивных полос молекулы хлора, а также хлоридов аргона и криптона. При малом парциальном давлении криптона (0.3–1.3 кПа) в спектрах излучения лампы наблюдались полосы ArCl (B → X) с  $\lambda \approx 175$  нм, KrCl (D → X) с  $\lambda \approx 199$  нм, KrCl (B → X) с  $\lambda \approx 222$  нм, а также Cl<sub>2</sub> (D' → A') с  $\lambda \approx 258$  нм. Эти полосы ранее наблюдались в спектрах УФ–ВУФ излучателей на основе продольного тлеющего разряда низкого давления и в спектре барьерного разряда повышенного давления в смеси Ar–Kr–Cl<sub>2</sub> [4]. Распределение интенсивности в спектре излучения лампы было наиболее чувствительным к парциальному давлению криптона в смеси, поскольку у атома криптона энергия нижних метастабильных энергетических уровней наи-

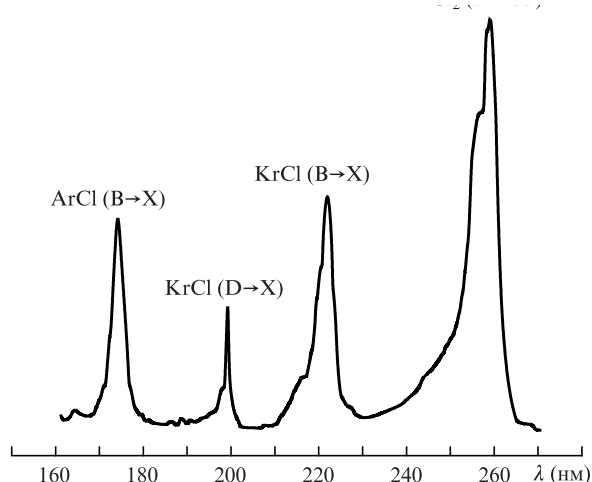


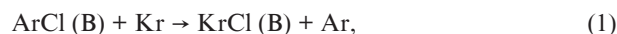
Рис.1. Спектр излучения многоволновой УФ–ВУФ лампы на смеси Ar:Kr:CCl<sub>4</sub> = 6.6:1.33:0.13 кПа при частоте следования импульсов тока  $f = 80$  Гц.

меньшая, а в образовании молекул галогенидов тяжелых инертных газов важную роль играют «гарпунная» реакция и ступенчатая ионизация атомов тяжелых инертных газов в ион-ионном канале образования эксиплексных молекул.

Увеличение парциального давления криптона в наносекундном барьерном разряде в смеси Ar–Kr–CCl<sub>4</sub> до 6.6 кПа приводило к доминированию в спектре излучения лампы полос хлорида криптона.

Особенностью использования молекул фреона (CCl<sub>4</sub>) в качестве хлорносителя (по сравнению с более простыми молекулами (HCl, Cl<sub>2</sub>)) в лампах на хлоридах тяжелых инертных газов [8] является увеличение интенсивности излучения полосы Cl<sub>2</sub> (D' → A') с  $\lambda \approx 258$  нм по сравнению с полосами ArCl (B → X) с  $\lambda \approx 175$  нм, KrCl (D → X) с  $\lambda \approx 199$  нм и KrCl (B → X) с  $\lambda \approx 222$  нм. Ввод криптона в двойную смесь Ar–CCl<sub>4</sub> (при  $p_{Kr} = 1.3$  кПа) приводил не к сильному изменению суммарной интенсивности УФ–ВУФ излучения молекулярных полос, а только к перераспределению их интенсивностей между собой.

Основным процессом, который управляет соотношением интенсивностей излучения полос ArCl (B → X) с  $\lambda \approx 175$  нм и KrCl (B → X) с  $\lambda \approx 222$  нм в барьерном разряде, является реакция замещения атомов аргона атомами криптона при образовании соответствующих эксиплексных молекул:



механизм которой связан с передачей энергии от метастабильных атомов аргона атомам криптона. Подобные реакции характеризуются достаточно большими константами скорости (например, для реакции замещения атомов криптона атомами ксенона при образовании молекул XeCl (B) константа составляет  $7 \times 10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с [9]).

На рис.2 приведены электрические характеристики лампы. С учетом падения напряжения на диэлектрических барьерах амплитуда импульса напряжения достигала 22 кВ при длительности отдельного выброса напряжения ~8–10 нс. Амплитуда основного максимума импульса тока составляла 25–50 нс при его длительности 10–30 нс. Основной энергетический вклад в плазму наносекундного барьерного разряда в тройной смеси происходил в течение ~50 нс. Максимальная импульсная мощность, вкладываемая в

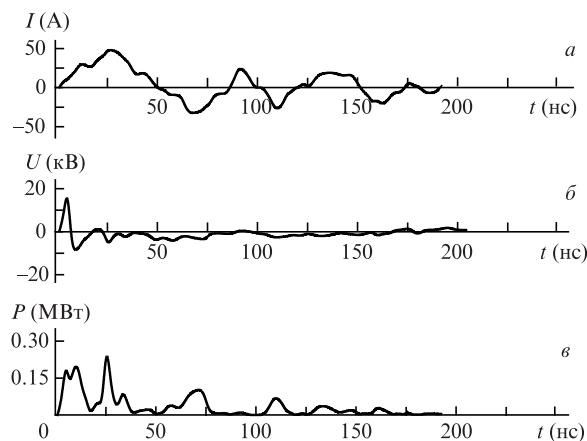


Рис.2. Осциллограммы импульсов тока (а), напряжения (б) и мощности (в), которая вкладывается в наносекундный барьерный разряд в смеси Ar:Kr:CCl<sub>4</sub> = 6.6:1.33:0.13 кПа при напряжении на рабочем конденсаторе 13 кВ ( $f = 80$  Гц).

разряд, достигала 0.15 – 0.20 МВт. Из-за рассогласования выхода генератора импульсного напряжения с нагрузкой (лампой) наблюдались три максимума энерговклада на протяжении 75 нс.

Основные результаты оптимизации интенсивности излучения многоволновой УФ–ВУФ лампы по давлению и парциальному составу рабочей смеси представлены на рис.3 и 4.

Исследование излучения полос хлоридов аргона и криптона показало, что оптимальное парциальное давление паров фреона ( $\text{CCl}_4$ ) находится в диапазоне 130–180 Па, а для полосы молекулы хлора интенсивность линейно возрастала с увеличением парциального давления фреона в диапазоне 30–300 кПа.

Увеличение парциального давления аргона в тройной смеси (при постоянных  $p_{\text{CCl}_4}$  и  $p_{\text{Kr}}$ ) в диапазоне 6.5 – 13.5 кПа приводило к сильному уменьшению интенсивности излучения полос  $\text{KrCl}$  ( $\text{B} \rightarrow \text{X}$ ) и  $\text{ArCl}$  ( $\text{B} \rightarrow \text{X}$ ). Оно практически не влияло на интенсивность полосы  $\text{Cl}_2$

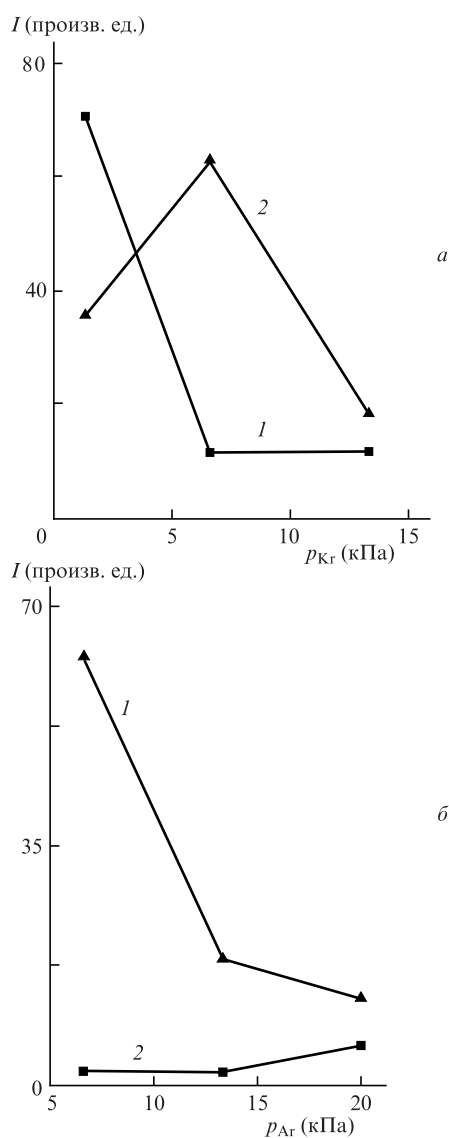


Рис.3. Зависимости интенсивности излучения полос  $\text{KrCl}$  ( $\text{B} \rightarrow \text{X}$ ) с  $\lambda \approx 222$  нм (1) и  $\text{ArCl}$  ( $\text{B} \rightarrow \text{X}$ ) с  $\lambda \approx 175$  нм (2) от парциального давления криптона в лампе на смеси  $\text{Ar}-\text{Kr}-\text{CCl}_4$  при  $p_{\text{CCl}_4} = 130$  Па и  $p_{\text{Ar}} = 6.6$  кПа (а) и от парциального давления аргона в лампе на той же смеси при  $p_{\text{CCl}_4} = 130$  Па и  $p_{\text{Kr}} = 6.6$  кПа (б).

( $\text{D}' \rightarrow \text{A}'$ ) с  $\lambda \approx 258$  нм, что связано в основном с уменьшением параметра  $E/p$ . Это обуславливает уменьшение концентрации метастабильных атомов и положительных ионов тяжелых инертных газов, которые в значительной степени определяют эффективность образования галогенидов инертных газов в результате «гарпунных» реакций и реакций ион-ионной рекомбинации.

Увеличение же парциального давления криптона от 1.2 до 6.6 кПа (при  $p_{\text{Ar}} = \text{const}$ ) приводило к значительному уменьшению интенсивности полосы с  $\lambda \approx 175$  нм из-за реакции замещения атомов аргона атомами криптона при образовании хлоридов аргона и криптона в плазме. Интенсивность излучения полосы молекулы хлора при этом также уменьшалась примерно на порядок. Для получения максимальной интенсивности полос излучения  $\text{KrCl}$  ( $\text{B} \rightarrow \text{X}$ ,  $\text{D} \rightarrow \text{X}$ ) оптимальное парциальное давление криптона в тройной смеси должно находиться в диапазоне 6 – 8 кПа.

Максимальная средняя мощность излучения лампы достигала 1.4 – 1.7 Вт (рис.4) при оптимальном парциальном давлении криптона  $p_{\text{Kr}} = 6 - 8$  кПа и фиксированном давлении аргона  $p_{\text{Ar}} = 1.3$  кПа. Дальнейшее увеличение  $p_{\text{Kr}}$  в тройной смеси приводило к уменьшению средней мощности УФ–ВУФ излучения лампы. При  $p_{\text{Ar}} = 1.3$  кПа и оптимальном  $p_{\text{Kr}}$  средняя мощность излучения достигала первого максимума, а при более высоком парциальном давлении аргона наблюдался ее второй максимум. При этом спектр излучения существенно изменился – он состоял в основном из полос молекулы хлора и хлорида криптона. Оптимизация зависимостей мощности излучения от парциального давления аргона показала, что мощность излучения лампы на основе тройной смеси в два раза больше мощности лампы на смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$ .

При охлаждении колбы лампы потоком воздуха от вентилятора она длительное время устойчиво работала при частотах следования импульсов тока 40–150 Гц. Интенсивности основных полос излучения лампы увеличивались при увеличении количества разрядных импульсов  $N$  в этом диапазоне частот до  $(3-5) \times 10^5$  и не менялись вплоть до  $N = 10^6$  (эксперименты с большим количеством импульсов не проводились).

При более высокой частоте возможно только кратковременное (на 5 – 10 мин) включение лампы. Ресурс работы при этом резко уменьшался, по видимому из-за ма-

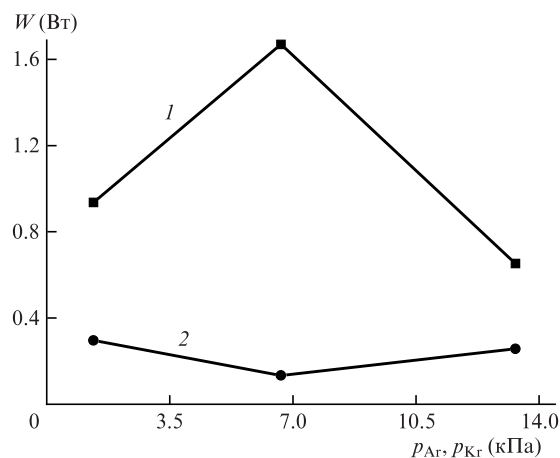


Рис.4. Зависимости средней мощности УФ–ВУФ излучения многоволновой лампы на смеси  $\text{Ar}-\text{Kr}-\text{CCl}_4$  от парциального давления криптона (при  $p_{\text{Ar}} = 1.3$  кПа) (1) и аргона (при  $p_{\text{Kr}} = 6.6$  кПа) (2) для  $p_{\text{CCl}_4} = 130$  Па.

лой эффективности системы воздушного охлаждения. В диапазоне 40 – 400 Гц частотные зависимости интенсивности полос излучения хлора и хлоридов инертных газов были нелинейными. При увеличении частоты до 1000 Гц эти зависимости становились линейными без признаков их насыщения. Такой характер зависимостей интенсивности от частоты может быть связан со вкладом продуктов диссоциации молекул фреона в образование эксимерных молекул и молекул  $Cl_2(D')$ .

Таким образом, исследование выходных характеристик многоволновой УФ–ВУФ лампы на основе газовой смеси  $Ar-Kr-Cl_2$  показало, что лампа излучает полосы хлоридов криптона и аргона с  $\lambda \approx 175$  и  $222$  нм соответственно, а также полосу молекулы хлора с  $\lambda \approx 258$  нм. Для полос  $B \rightarrow X$  излучения молекул  $KrCl$  и  $ArCl$  оптимальное парциальное давление паров фреона находится в диапазоне 130–180 Па, а для полосы  $Cl_2$  с  $\lambda \approx 258$  нм составляет 300 Па; оптимальное парциальное давление криптона находится в диапазоне 6–8 кПа, а оптимальное давление аргона равно 1.3 кПа. Средняя мощность излучения лампы при частоте следования импульсов 80 Гц достигает 1.7 Вт, а ресурс ее работы в газостатическом режиме в диапазоне частот 40–150 Гц составляет  $10^6$  имп., что примерно на два порядка больше, чем для соответствующих ламп на основе поперечного объемного разряда [3, 10]. Варьируя давление и парциальный состав газовой смеси, можно управлять спектром излучения лампы в диапазоне длин волн 170–260 нм. Это может быть использовано для одновременного и селективного разрушения связей в

разных основаниях нуклеиновых кислот: так, максимум поглощения аденина находится на  $\lambda \approx 260$  нм (соответствует полосе излучения молекулы хлора), а цитозина – на  $\lambda \approx 220$  нм (соответствует полосе излучения хлорида криптона) [11].

1. Бойченко А.М., Ломаев М.М., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. *Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксимерные лампы: физика, техника и применения* (Томск: SST, 2011).
2. Шуаибов А.К., Дашенко А.И. *Квантовая электроника*, **30**, 279 (2000).
3. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **36**, 169 (2006).
4. Авдеев С.М., Соснин Э.А., Смирнов А.А., Тарасенко В.Ф. *Изв. Томского политехнического ун-та. Сер. Энергетика*, **317**, 161 (2010).
5. Erofeev M.V., Tarasenko V.F. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, 3609 (2006).
6. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **38**, 88 (2008).
7. Шуаибов А.К., Миня А.И., Гомоки З.Т., Грицак Р.В. *Оптика и спектроскопия*, **114**, 30 (2013).
8. Грицак Р.В., Шуаибов А.К., Миня А.И., Гомоки З.Т., Варга Т.И. *Вестн. Ужгородского национального ун-та. Сер. Физика*, **34**, 5 (2014).
9. Шуаибов А.К., Шевера В.С. *Оптика и спектроскопия*, **47**, 409 (1979).
10. Шуаибов А.К., Чигинь В.И., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Горун П.П. и др. *ЖТФ*, **80** (5), 87 (2010).
11. Шуаибов О.К., Шевера И.В., Шимон Л.Л., Соснин Е.А. *Сучасні джерела ультрафіолетового випромінювання: розробка та застосування* (Ужгород–Томськ: Говерла, 2006).

PACS 01.60.+q



Редсовет, редколлегия и редакция журнала «Квантовая электроника», коллектив и дирекция ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха», коллеги и ученики сердечно поздравляют крупного российского ученого, пионера создания полупроводникового лазера, доктора технических наук, профессора, лауреата Ленинской премии СССР, заместителя директора НИИ «Полюс» по направлению «Полупроводниковые лазеры»

## ВАСИЛИЯ ИВАНОВИЧА ШВЕЙКИНА

с 80-летием

и желают ему крепкого здоровья, творческого долголетия, счастья и успехов во всех его начинаниях.

Руководимые В.И.Швейкиным перспективные разработки полупроводниковых лазеров и приборов на их основе и сегодня являются одними из важнейших. Многие из созданных приборов нашли широкое применение в народном хозяйстве. Под руководством В.И.Швейкина в институте была создана научно-производственная база, обеспечивающая их гражданские и специальные применения.

За работы в области полупроводниковых лазеров Василий Иванович Швейкин награжден орденом Трудового Красного Знамени и юбилейной медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И.Ленина», он имеет звание «Лучший конструктор отрасли» и награжден знаком «Почетный работник электронной промышленности».