

КИНЕТИКА ЭЛЕКТРИЗАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОКСИДА МАГНИЯ

А.А. Татаринцев, Е.Ю. Зыкова, А.Е. Иешкин, Н.Г. Орликовская, В.А. Киселевский

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: tatarintsev@physics.msu.ru



Аннотация

Представлены результаты исследования кинетики электризации монокристаллического оксида магния при облучении электронами с энергией до 20 кэВ [1]. Обнаружена задержка в процессе зарядки образцов при облучении электронами с низкой энергией. Для объяснения такого поведения рассмотрено влияние на процесс зарядки высокой вторичной электронной эмиссии, а также растекания заряда в объеме образца. По результатам экспериментов и моделирования области взаимодействия электронов с оксидом магния выдвинуто предположение о локализации области накопления заряда. Изменение в процессе электронного облучения интенсивности линий катодолуминесценции, связанных с дефектами, позволило предположить, что облучение электронами влияет на структуру оксида магния. Высказано предположение, что уменьшение интенсивности линии 2,9 эВ, связанной с комплексами вакансий, при облучении электронами с энергией 15 кэВ связано с разрушением этих комплексов.

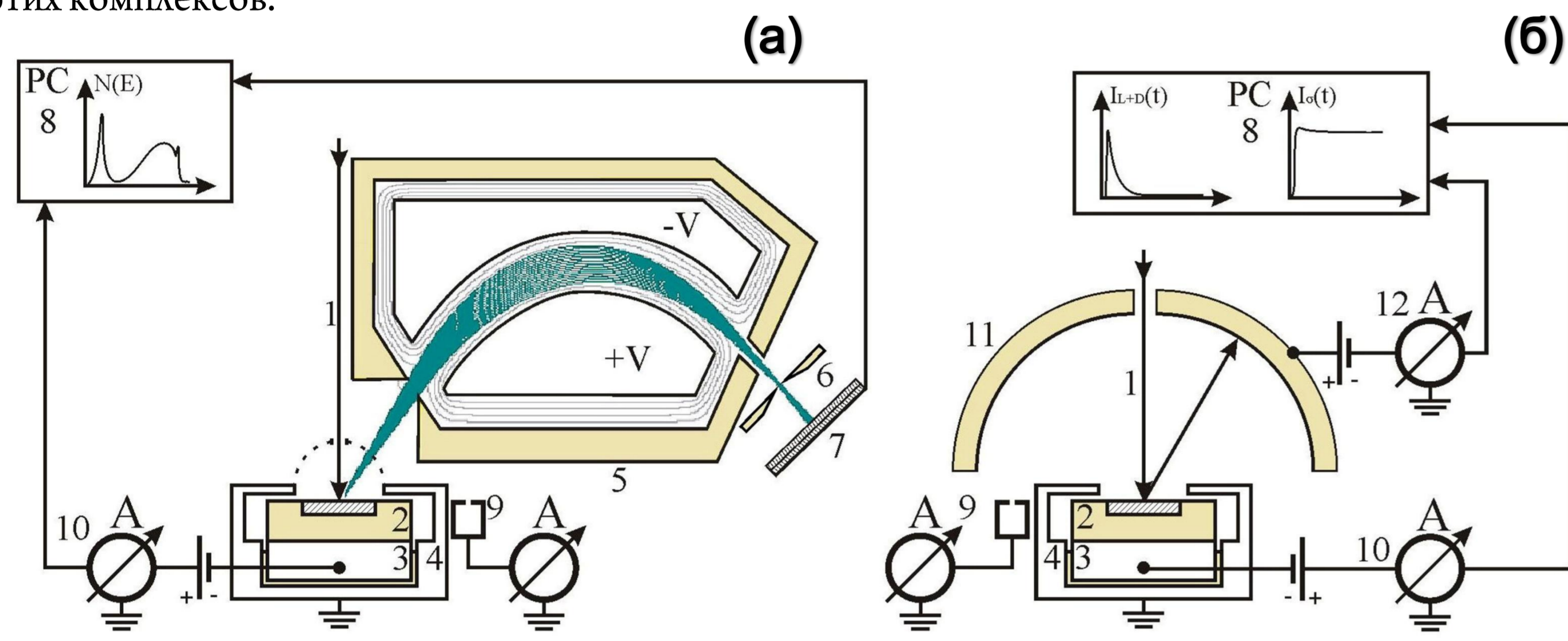


Рис. 1. Схема проведения комплексных экспериментов для исследования радиационной поверхностной электризации при облучении пучками электронов: (а) поверхностного потенциала, (б) – токовых характеристик. Обозначения: 1 – электронный зонд СЭМ, 2 – сегнетоэлектрический образец, 3 – металлическая подложка образца, 4 – защитный экранирующий корпус, 5 – сектор тороидального электронного спектрометра, 6 – выходная диафрагма, 7 – МКП детектор, 8 – управляющий ПК, 9 – цилиндр Фарадея, 10 – наноамперметр, 11 – усеченный полусферический коллектор электронов, 12 – наноамперметр или электромметр.

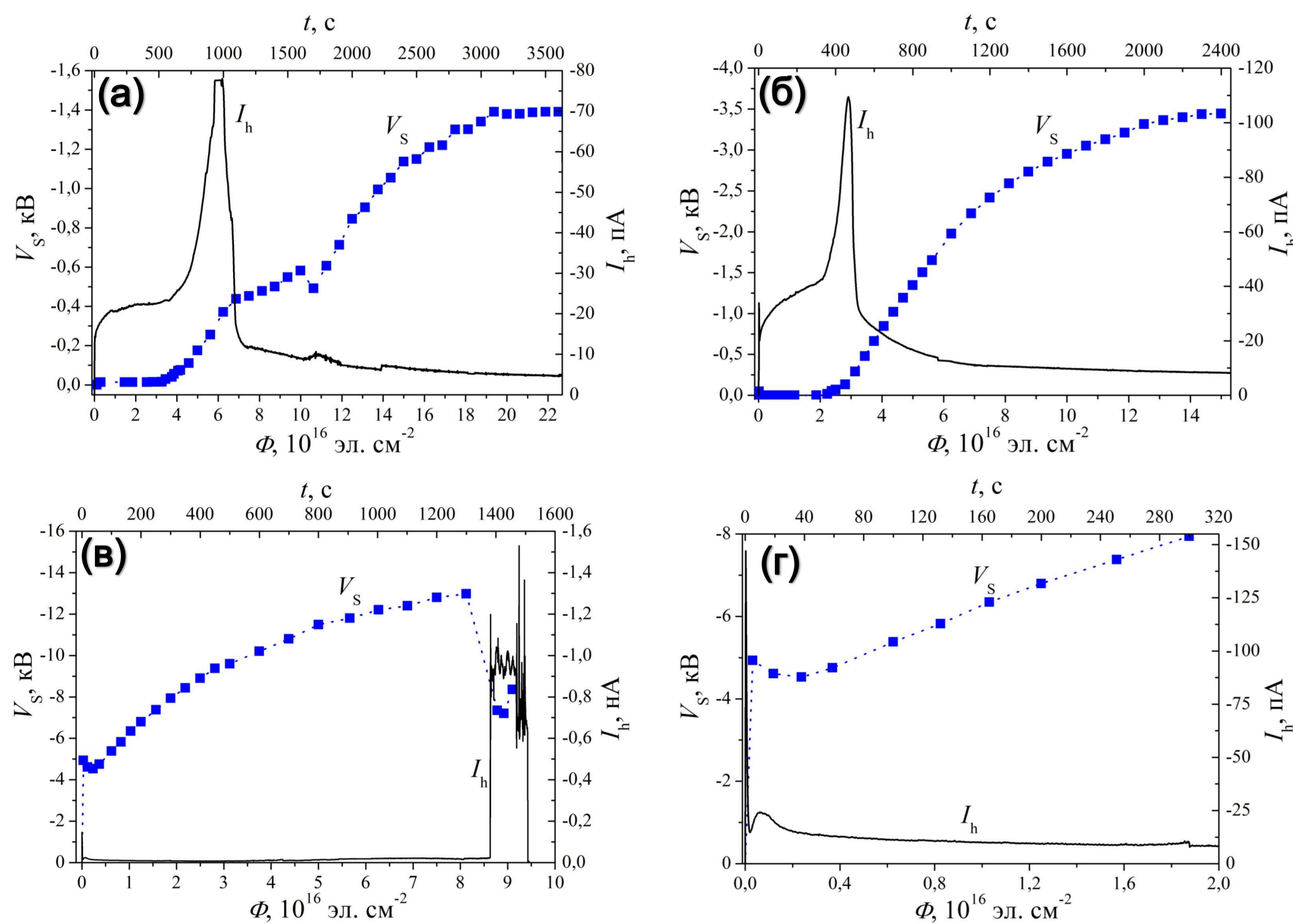


Рис. 2. Зависимость поверхностного потенциала V_s (точки и пунктирная линия) и тока I_h с держателя образца (сплошная кривая) от флюенса Φ электронов с энергиями $E_0=2,5$ кэВ (а), 5 кэВ (б) и 15 кэВ (в), (г). Плотность облучающего тока $j_0=10^{-5}$ А/см².

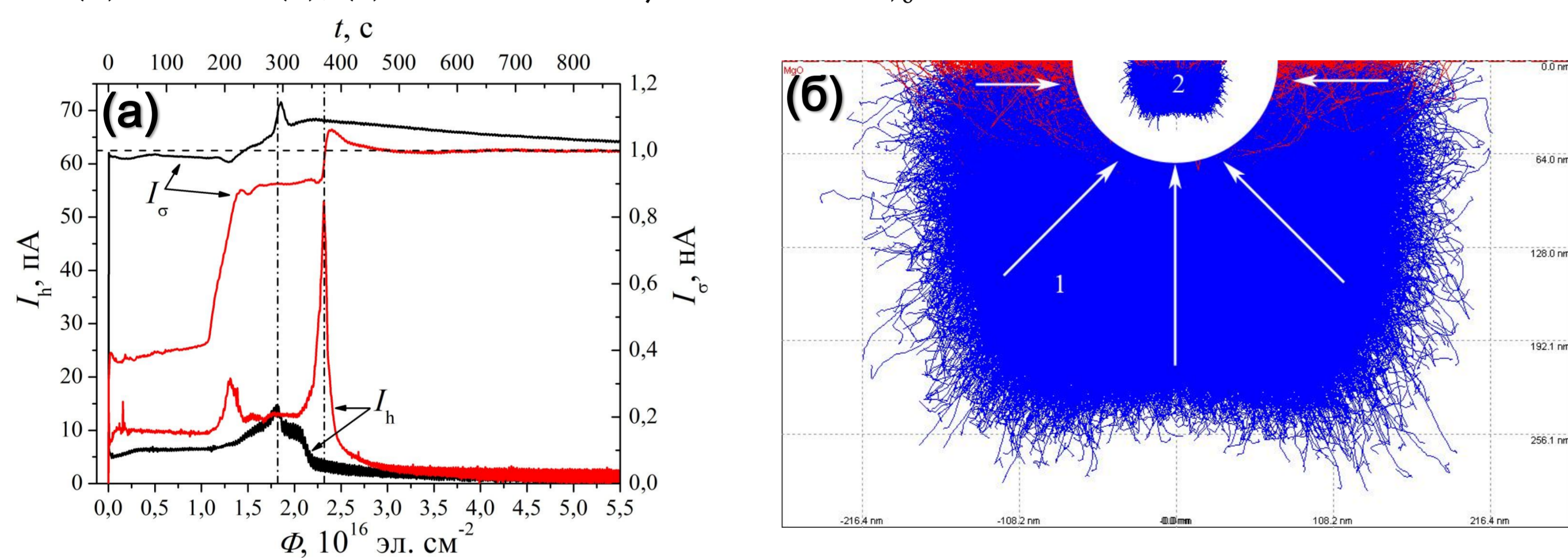


Рис. 3. (а) Зависимость токов с эмиссии I_e и тока I_h от флюенса Φ электронов с энергией $E_0=5$ кэВ для двух экспериментов при одинаковых условиях. Горизонтальная пунктирная линия отмечает положение $\sigma=1$, а вертикальные соответствующие максимумы тока I_h . (б) Изменение области взаимодействия электронов в процессе зарядки: 1 – начальная область облучения $E_0=5$ кэВ. На вставке в виде белой полуокружности показана область 2, когда фактическая энергия электронов уменьшается за счет зарядки до величины $E_1=1,56$ кэВ.

Литература

1. А. А. Татаринцев, Е. Ю. Зыкова, А. Е. Иешкин, et.al. Appl. Surf. Sci., V. 660, 2024, p. 159964.
2. Э.И. Рау, А.А. Татаринцев // ФТТ, 2021, т. 63, № 4, с. 483.
3. Э. И. Рау, А. А. Татаринцев, Е. Ю. Зыкова и др. // ФТТ, 2017, т. 59, № 8, с. 1504.
4. Е. Ю. Зыкова, А. Е. Иешкин, Н. Г. Орликовская, А. А. Татаринцев, В. В. Khvostov, Y. V. Balakshin, Radiat. Phys. Chem., vol. 217, p. 111481, 2024.
5. A. Boughariou, A. Kallel, and G. Blaise, Appl. Surf. Sci., V. 313, pp. 736–741, 2014.
6. Е. А. Kotomin and A. I. Popov, Nucl. Inst. and Meth. Phys. Res. B. V. 141, N 1–4, pp. 1–15, 1998.

Методы исследования

Исследования кинетики зарядки оксида магния проводилось с помощью электростатического спектрометра электронов, установленного в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) LEO 1455VP [2, 3] (рис. 1). Потенциал зарядки определялся по сдвигу спектра вторичных электронов. Оксид магния облучался эффективной плотностью облучающего тока $j_0=10^{-5}$ А/см² (плотность потока электронов $\varphi=6,25 \cdot 10^{13}$ эл. см⁻² с⁻¹). Одновременно со спектрами в процессе эксперимента регистрировался ток с металлического держателя образца I_h . Давление в камере СЭМ было около $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ Торр.

Регистрация спектров катодолуминесценции проводилась в сверхвысоковакуумной камере Varian при помощи микроспектрометра Ocean STS-VIS в диапазоне длин волн 350-850 nm [4]. Плотность тока при регистрации катодолуминесцентного спектра составляла $1,5 \cdot 10^{-3}$ А/см², облучение проводилось расфокусированным пучком с диаметром ~ 3 мм. Так как электронная пушка была ограничена максимальным ускоряющим напряжением 3 kV, то для ускорения электронов до необходимой падающей энергии на весь столик, на котором был закреплен образец, подавался дополнительный потенциал. Вакуум в процессе измерений спектров катодолуминесценции составлял 10^{-8} Торр.

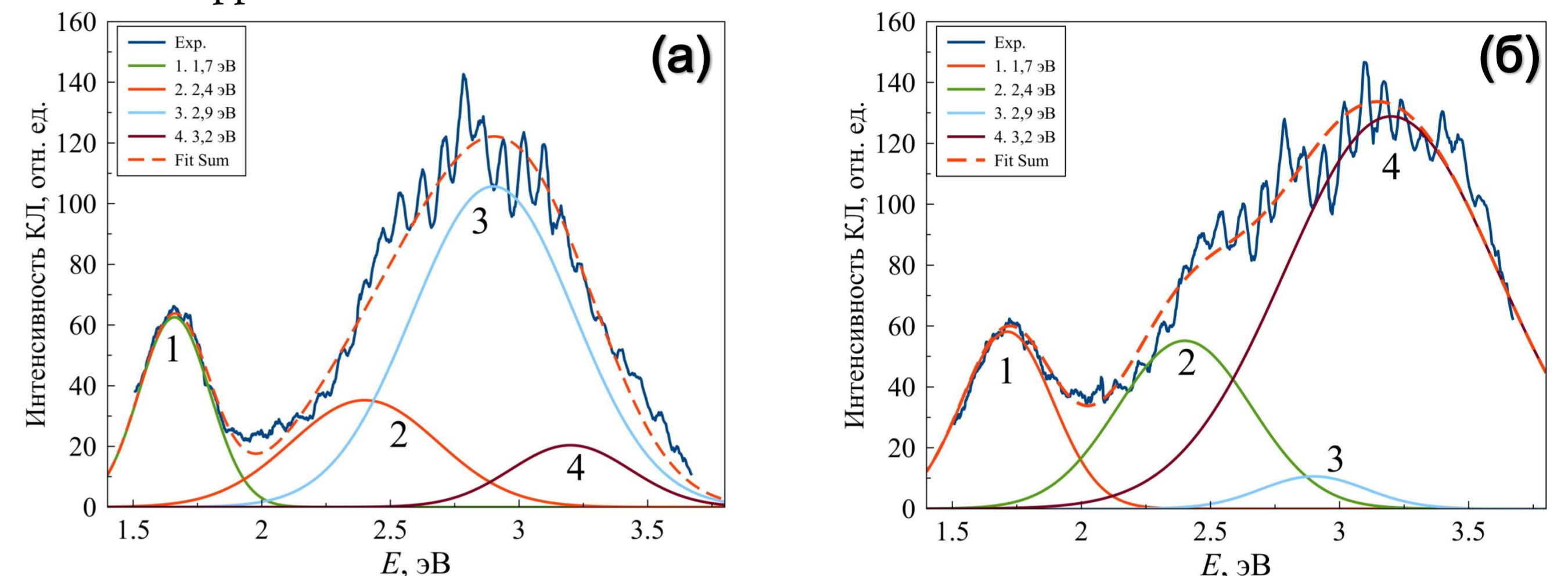


Рис. 4. Спектры катодолуминесценции монокристаллического MgO после облучения электронами с энергией 15 кэВ с флюенсами $9 \cdot 10^{16}$ эл. см⁻² (а) и $2,7 \cdot 10^{18}$ эл. см⁻² (б).

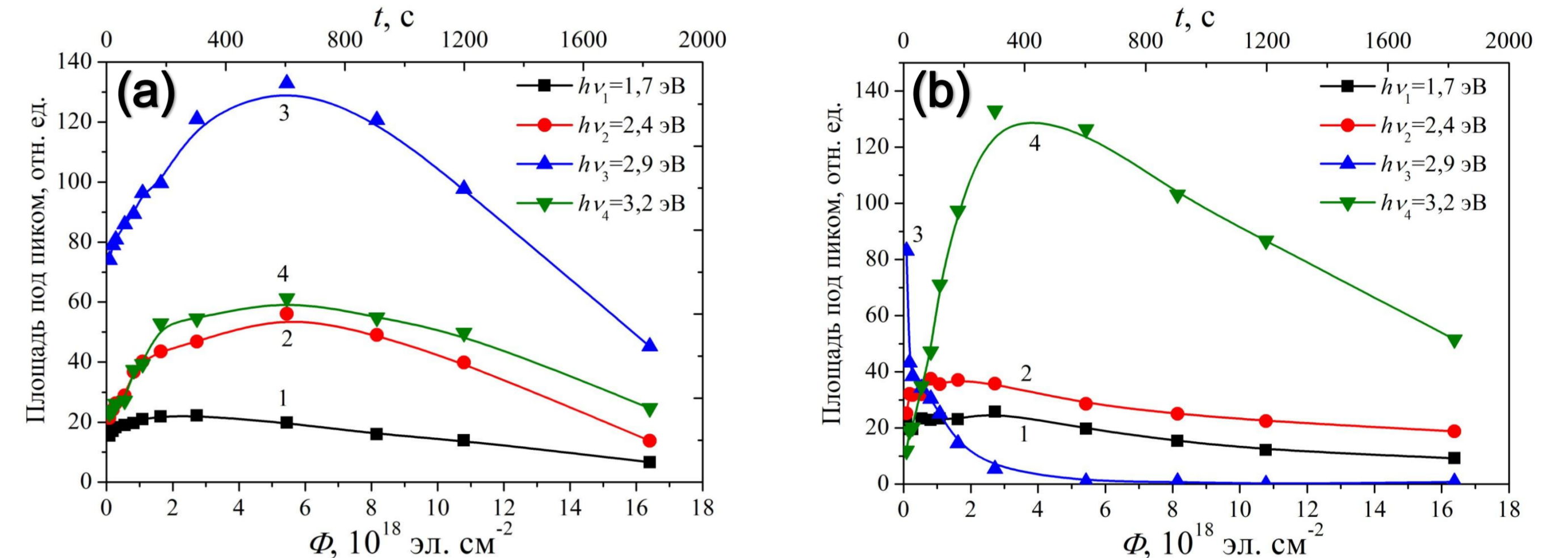


Рис. 5. Изменение площадей под гауссовыми кривыми деконволюции спектров катодолуминесценции, зарегистрированных при облучении MgO электронами с энергией 2,5 кэВ (а) и 15 кэВ (б) от флюенса электронов. Цифрами обозначены линии: 1 – 1,7 эВ, 2 – 2,4 эВ, 3 – 2,9 эВ, 4 – 3,2 эВ.

Обсуждение и выводы

В работе исследована кинетика процесса электризации монокристаллического оксида магния при облучении электронами с энергией до 20 кэВ. Обнаружена задержка в процессе зарядки образцов при облучении электронами с энергией 2,5 и 5 кэВ (рис. 2а, б), а также незначительная задержка и уменьшение потенциала зарядки в начальный момент при 15 кэВ (рис. 2в, г). Для объяснения такого поведения рассмотрено влияние на процесс зарядки высокого коэффициента вторичной электронной эмиссии, растекания заряда в объеме и образование ловушек электронов в процессе облучения.

Оксид магния обладает высоким коэффициентом вторичной электронной эмиссии, что сказывается на накоплении положительного заряда на поверхности облучаемой области. Для оксида магния, полученного разными способами, максимальное значение коэффициента вторичной электронной эмиссии δ_{max} лежат в интервале $\sim 3,5 < \delta_{max} < 26$ при энергиях $0,8 < E_{0max} < 1,4$ кэВ при этом полный коэффициент ВЭЭ $\sigma > 1$ вплоть до 15 кэВ [5]. Это будет приводить к значительному накоплению положительного заряда в первый момент времени облучения, но затем условия для эмиссии будут изменяться, а именно будут возникать электрические поля, способные возвращать часть вторичных электронов на положительно заряженную поверхность (рис. 3а). Возврат электронов будет приводить к образованию структуры зарядов минус-плюс-минус, что влияет на задержку зарядки.

Экспериментально обнаружено, что при облучении электронами с энергией 2,5 кэВ в течение часа растекание заряда не превышает 1 мм от первоначальной области облучения. На основе результатов моделирования области взаимодействия электронов с оксидом магния выдвинуто предположение о локализации области накопления заряда (рис. 3б). Такое ограничение области зарядки позволяет качественно описать измеренные токовые характеристики.

Влияние облучения электронами на структуру оксида магний определялось по изменению интенсивности линий катодолуминесценции, связанных с дефектами. Деконволюция этих экспериментальных спектров катодолуминесценции проводилась с учетом четырех линий с максимумами интенсивности при энергиях $h\nu_1=1,7$ эВ (термолуминесценция при разрушении V-центров), $h\nu_2=2,4$ эВ (вакансии кислорода F-центры), $h\nu_3=2,9$ эВ (комплексы вакансий высокого порядка) и $h\nu_4=3,2$ эВ (F⁺-центры). При облучении оксида магния электронами с энергией 15 кэВ происходит изменение спектра (рис. 4 и рис. 5б) – возрастает линия 3,2 эВ и снижается линия 2,9 эВ. Это может быть связано с распадами комплексных вакансий в процессе облучения на F⁺-центры. При этом незначительно возрастает также и линия, связанная с F-центрами. Возрастание F и F⁺-центров не может быть связано с образованием вакансий кислорода в оксиде магния. Прямое смещение ионов решетки может возникнуть здесь лишь выше порога энергии падающих электронов 0,33–0,35 МэВ, что соответствует энергии смещения кислорода около 60 эВ [6]. Общий спад катодолуминесценции на рис. 5 связан с зарядкой оксида магния и уменьшении фактической энергии падающих электронов.