

# ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

Е.Ю. Зыкова, А.Е. Иешкин, Н.Г. Орликовская, Э.И. Рау, А.А. Татаринцев  
Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
e-mail: tatarintsev@physics.msu.ru



Для установления влияния допорогового дефектообразования на накопление заряда в кварцевых стёклах проведено комплексное исследование процесса их электризации электронными пучками. Ранее было показано, что процесс радиационной электризации кварцевых стёкол состоит из двух стадий. Кратковременная стадия зарядки может быть объяснена накоплением заряда на исходные ловушечные центры, а долговременная составляющая может быть вызвана генерацией глубоких ловушечных центров, способных к захвату электронов. В исследуемых образцах кварца центрами захвата могут являться трехкоординированные атомы кремния (E'-центры). Наличие двух стадий процесса зарядки подтверждено двумя разными методами определения поверхностного потенциала. Несмотря на рост потенциала поверхности в процессе облучения и вызванное им уменьшение энергии падающих электронов, наблюдается увеличение интенсивности катодолюминесцентного сигнала. Такой рост интенсивности может быть вызван ростом числа люминесцирующих дефектов в кварце – двухкоординированного атома кремния или нестикового атома кислорода, а также накоплением заряда на конкурирующих безызлучательных ловушечных центрах.

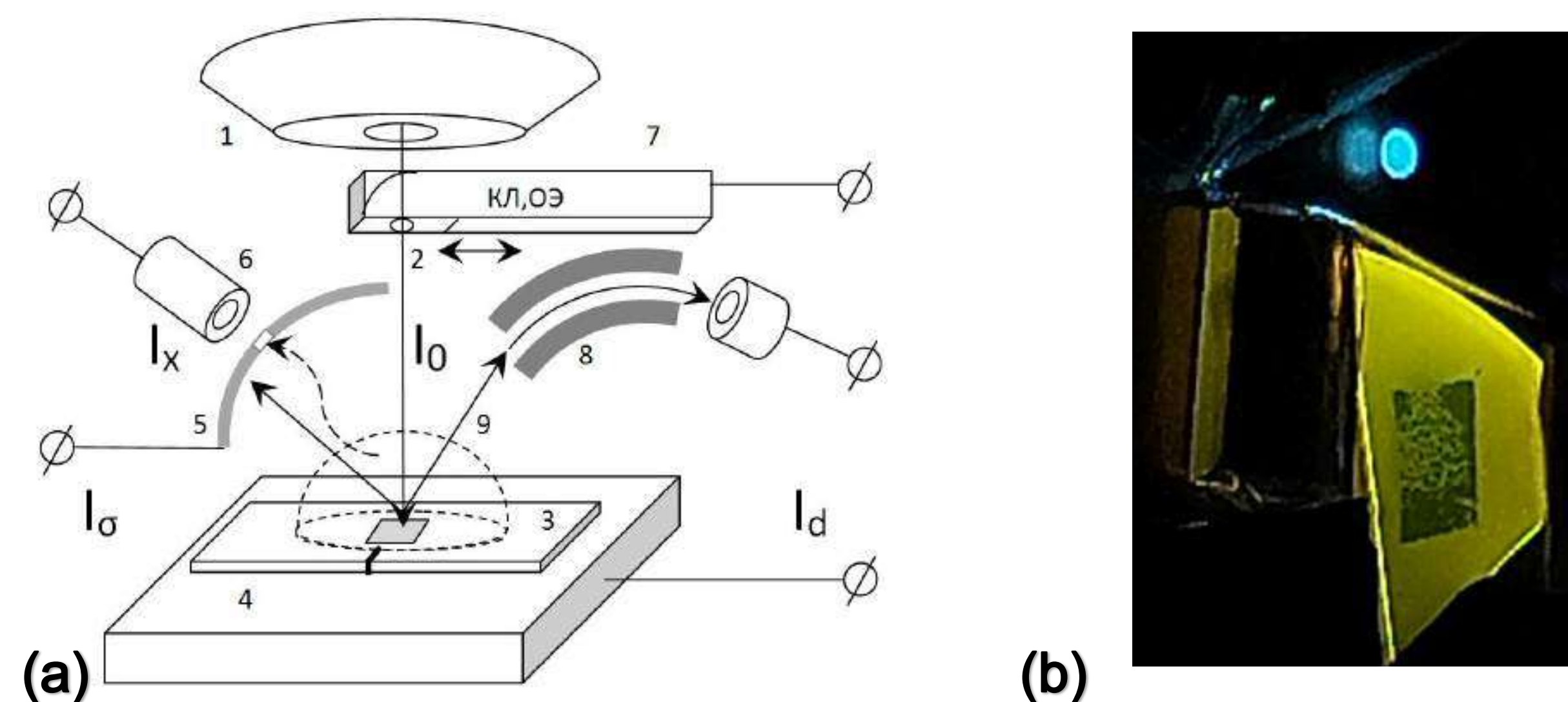


Рис. 1. (а) Сводная схема экспериментальных устройств для измерения сигналов в СЭМ: 1 – объективная линза СЭМ; 2 – электронный зонд; 3 – диэлектрическая мишень; 4 – металлическая подложка; 5 – полусферический коллектор; 6 – детектор рентгеновского излучения; 7 – сменные детекторы КА или ОЭ; 8 – электронный энергоанализатор; 9 – заземленная сетка. (б) Общий вид пятна люминесценции в процессе спектрометрических измерений.

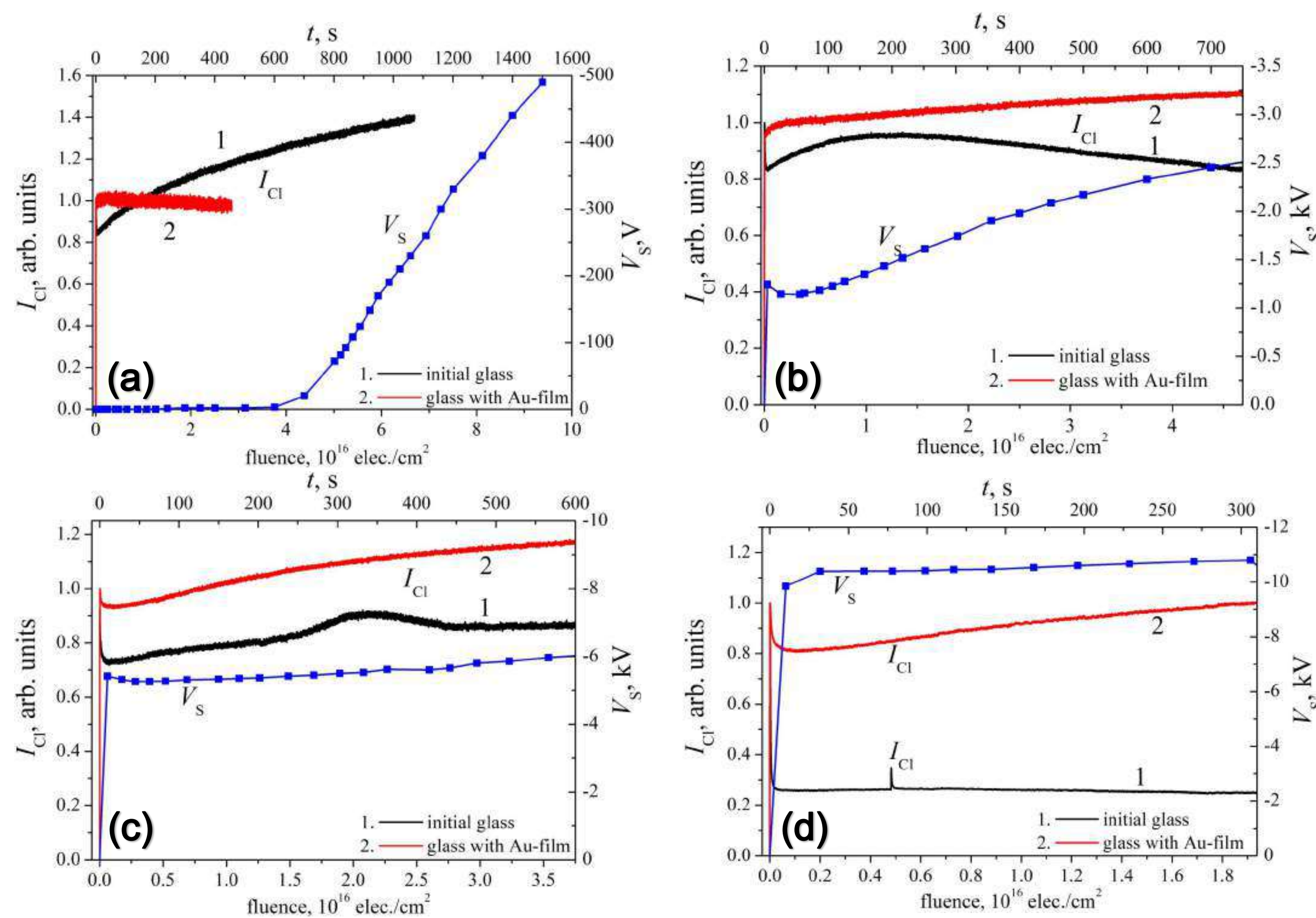


Рис. 2. Зависимость интенсивности катодолюминесценции  $I_{Cl}$  и потенциала зарядки  $V_s$  кварца от флюенса электронов, а также от времени облучения (верхняя шкала) электронами с энергией  $E_0=2.5$  keV (а), 5 keV (б), 10 keV (с) и 15 keV (д) плотностью тока  $j_0=10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>. Нормированные зависимости интенсивности катодолюминесценции от времени представлены для исходного кварца (1) и образца покрытого плёнкой Au толщиной 14 nm (2).

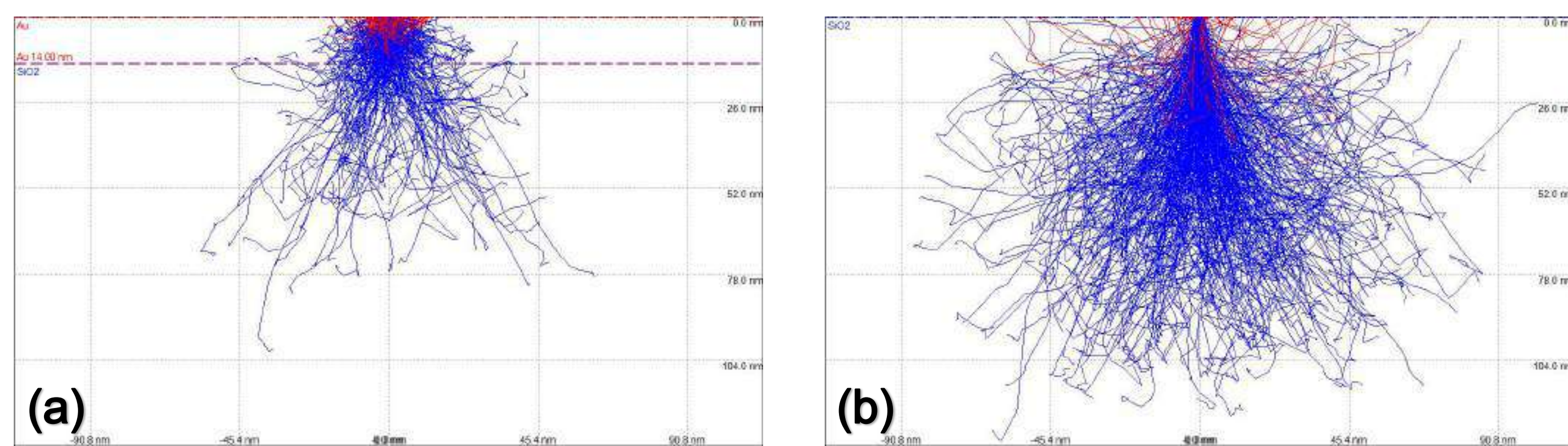


Рис. 3. Область взаимодействия электронного пучка с кварцевым стеклом при энергии  $E_0=2.5$  keV, покрытым плёнкой Au (а) и с исходным образцом (б).

## Литература

- Э.И. Рау, А.А. Татаринцев // ФТТ, 2021, т. 63, № 4, с. 483.
- Э. И. Рау, А. А. Татаринцев, Е. Ю. Зыкова и др. // ФТТ, 2017, т. 59, № 8, с. 1504.
- L. Skuja. Journal of Non-Crystalline Solids, 239, 16 (1998).
- H.-J. Fitting, T. Barfels, A.N. Trukhin, B. Schmidt. Journal of Non-Crystalline Solids, 279, 51 (2001).
- L. Skuja, N. Ollier, K. Kajihara. Radiation Measurements, 135, 106373 (2020).

Исследования динамики поверхностного потенциала кварца в процессе зарядки проводились с помощью электростатического спектрометра электронов, установленного в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) LEO 1455VP [1, 2]. В этом же СЭМ регистрировался интегральный сигнал катодолюминесценции при помощи детектора Centaurus в диапазоне видимых длин волн 300-650 nm. В процессах эксперимента облучалась область  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  в режиме быстрого сканирования электронным пучком с током  $I_0=1$  nA. Давление в камере СЭМ было около  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  Торр.

Регистрация спектров катодолюминесценции проводилась в сверхвысоковакуумной камере Varian при помощи микроспектрометра Ocean STS-VIS в диапазоне длин волн 350-850 nm. Плотность тока при регистрации катодолюминесцентного спектра составляла  $3 \cdot 10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup>, облучение проводилось расфокусированным пучком с диаметром  $\sim 2$  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 закреплён образец, подавался дополнительный потенциал.

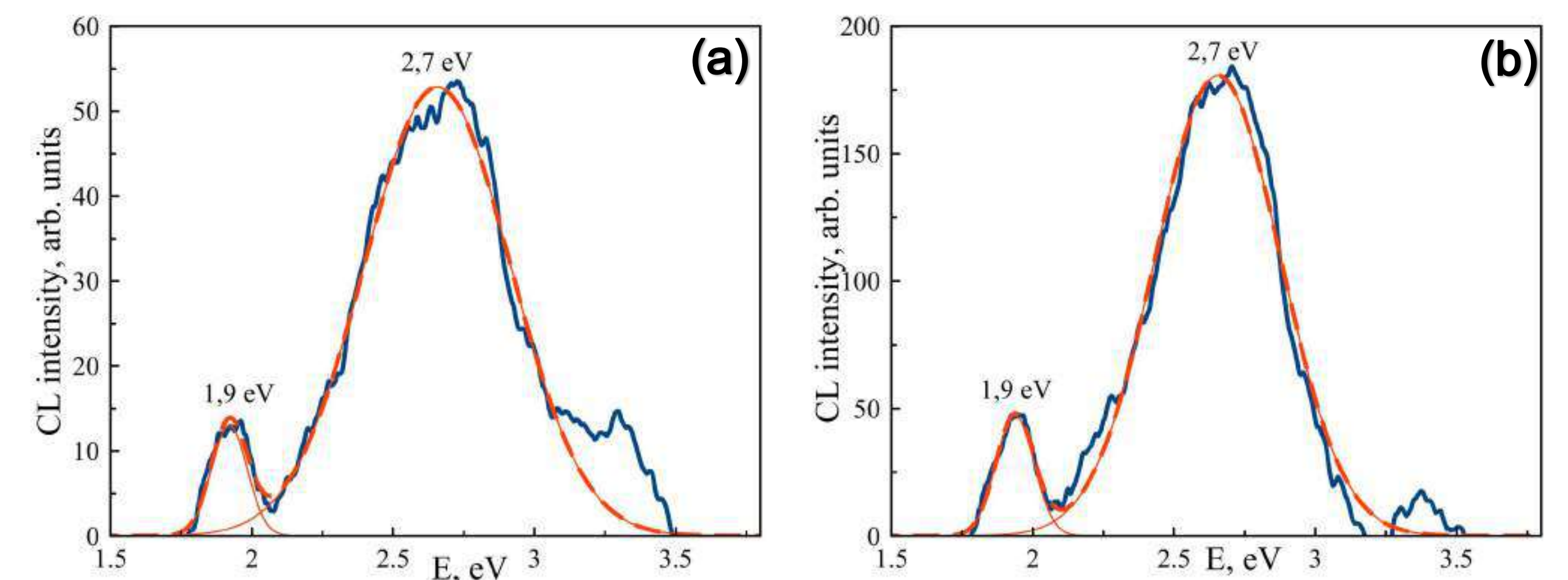


Рис. 4. Спектры катодолюминесценции кварцевого стекла под плёнкой золота через 11 s после начала облучения (а) и через 530 s (б). Спектры сняты при  $E_0=5$  keV.

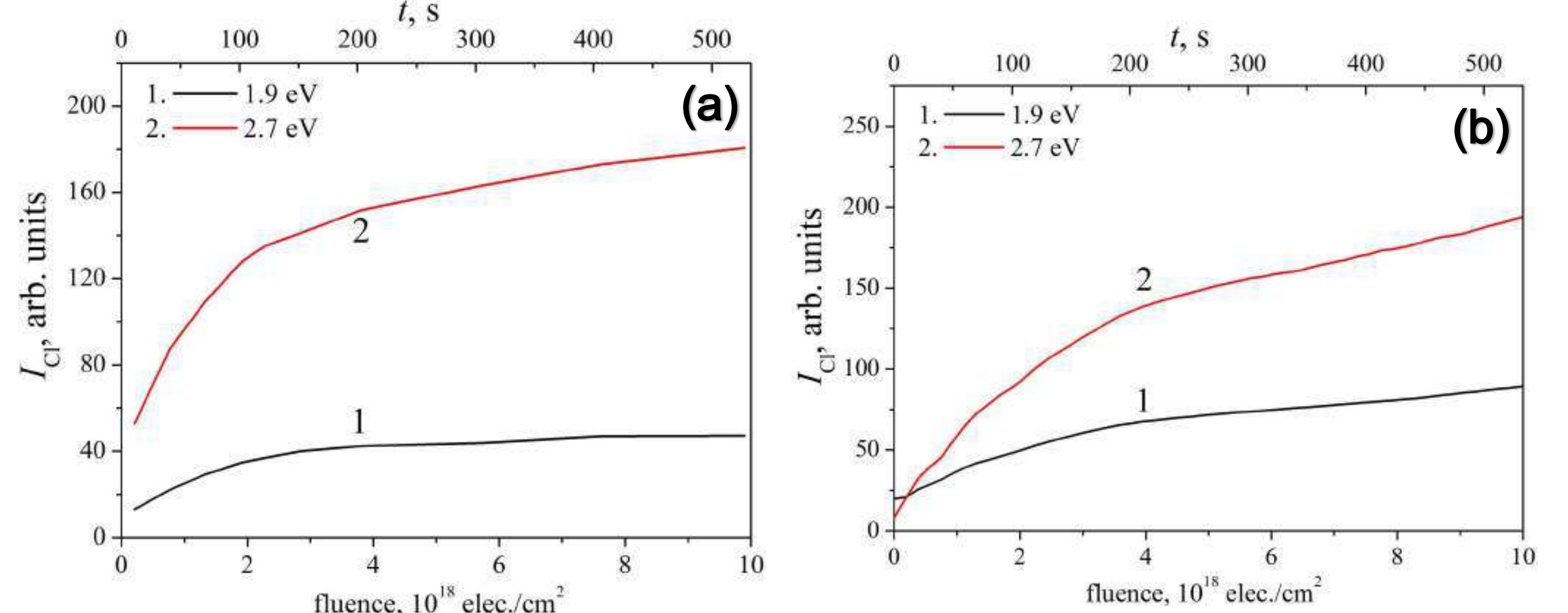


Рис. 5. Динамика интенсивности линий катодолюминесценции, связанных с нестиковым атомом кислорода (линия 1) и с двухкоординированным атомом кремния (линия 2) от флюенса электронов (времени облучения) для энергии первичного пучка (а)  $E_0=5$  keV и (б)  $E_0=15$  keV. Плотность тока  $j \sim 3 \cdot 10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup>.

Для понимания структурных изменений в кварцевых стеклах в процессе зарядки были сняты катодолюминесцентные спектры при энергии падающего электронного пучками с энергиями  $E_0=5$  keV и 15 keV (рис. 5). В спектре катодолюминесценции кварца наблюдаются две основные полосы люминесценции, имеющие максимумы интенсивности на энергии 2.7 eV (длина волны 460 nm) и 1.9 eV (650 nm), которые могут быть интерпретированы как излучение собственных дефектов. Положение наблюдаемой линии при энергии 1.9 eV связано с излучением дырочного центра нестикового атома кислорода ( $\equiv\text{Si}-\text{O}-$ ), образующегося в результате разрыва кремний-кислородной связи. Второй дефект этой пары – трехкоординированный атом кремния (E'-центр) – может быть преобразован в двухкоординированный атом кремния ( $=\text{Si}$ ), характеризующийся двумя полосами люминесценции с энергиями 2.7 eV и 4.4 eV [3, 4, 5]. При этом на свободную кремниевую связь может захватываться электрон, а на кислородную – дырка. Для разрыва регулярной сетки связей кварцевого стекла необходима энергия, превышающая энергию химической связи и составляющей примерно 8-9 eV, что существенно меньше энергии, необходимой для образования дефектов при упругом взаимодействии.

## Выводы

Процесс радиационной электризации кварцевых стёкол состоит из двух стадий. Кратковременная стадия зарядки – образец за единицы секунд заряжается до высокого значения потенциала, что может быть объяснено накоплением заряда на исходные ловушечные центры, содержащиеся в кварце. Следующая за ней долговременная составляющая может быть вызвана генерацией ловушечных центров захвата электронов. В исследуемых образцах кварца такими центрами захвата могут являться трехкоординированные атомы кремния (E'-центр).

Наличие двух стадий процесса зарядки подтверждено по измерению поверхностного потенциала электронно-спектрометрическим методом. При этом замедление роста поверхностного потенциала для низких значений падающей энергии ( $E_0 \leq 5$  кэВ) может быть объяснено положительной зарядкой поверхности или растеканием заряда в виду относительно малого сопротивления кварцевых стёкол. Дальнейшее накопление зарядов будет происходить при захвате электронов на вновь созданные относительно глубокие ловушки.

Несмотря на рост потенциала поверхности и вызванное им уменьшение падающей энергии, наблюдается преимущественно рост интенсивности катодолюминесцентного сигнала. Такой рост интенсивности может быть вызван ростом числа люминесцирующих дефектов в кварце – двухкоординированного атома кремния или нестикового атома кислорода. Что подтверждает рост катодолюминесцентного сигнала при снижении темпа накопления поверхностного потенциала. В некоторых случаях также не исключён механизм роста катодолюминесцентного сигнала за счёт накопления заряда на конкурирующих безызлучательных ловушечных центрах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00083, <https://tsf.ru/project/23-22-00083>