

## Аннотация

Оксид гафния уже больше десятилетия используется в микроэлектронике в качестве подзатворного диэлектрика. После открытия сегнетоэлектрических свойств в тонких пленках оксида гафния, стало возможным их применение в сегнетоэлектрической памяти – ferroelectric random-access memory (FeRAM). Данный тип памяти является энергонезависимым и энергоэффективным, что делает его привлекательным для использования в мобильных устройствах и компьютерах. Пленки оксида гафния имеют дефекты, которые могут влиять на сегнетоэлектрические свойства. В данной работе были проведены измерения вольт-амперных характеристик и моделирование транспорта заряда для изучения эволюции поляризации и концентрации дефектов в процессе циклирования – последовательных циклов переключения поля в пленках.

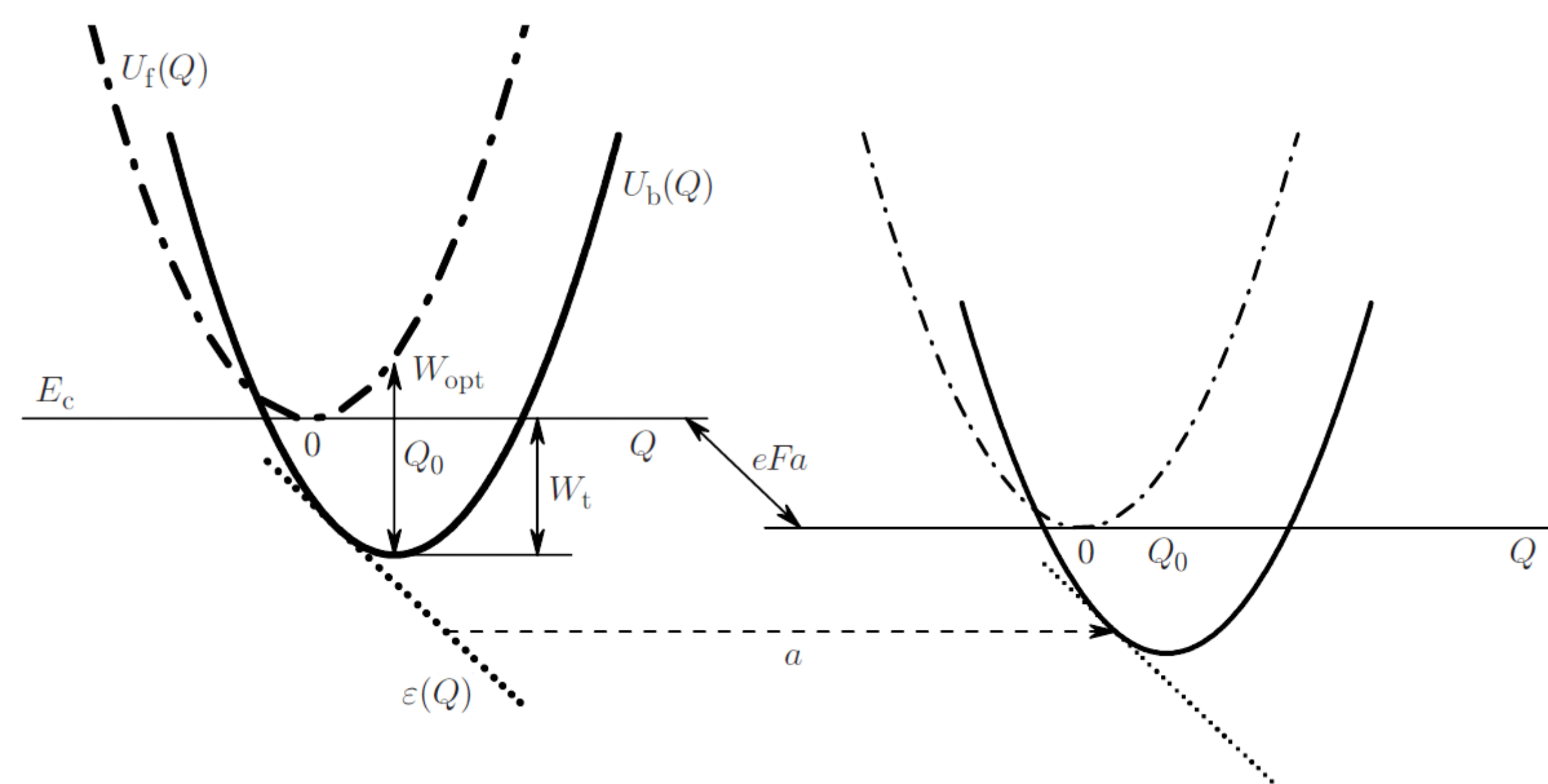
## Фонон-облегченное туннелирование между ловушками

Для диэлектриков с высокими концентрациями ловушек основной вклад в перенос заряда дает эффект туннелирования между ловушками. Вероятность туннелирования:

$$P = \int_{\varepsilon > 0} \frac{\hbar |\varepsilon|}{m^* a^2 k T Q_0} \exp \left( - \frac{(Q - Q_0)^2 - (Q - eFa/Q_0)^2}{2kT} - \frac{4\sqrt{2m^*} \left( (-\varepsilon)^{3/2} - (-\varepsilon - eFa)^{3/2} \right)}{3 eF\hbar} \right) dQ,$$

$$\varepsilon = -Q_0(Q - Q_0) - W_{opt}, \quad Q_0 = \sqrt{2(W_{opt} - W_t)}.$$

Здесь  $\varepsilon$  – энергия локализованного электрона,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $m^*$  – эффективная масса носителя заряда (электрона),  $a$  – расстояние между ловушками,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $Q$  – конфигурационная координата системы захваченного на ловушку электрона и фононов,  $Q_0$  – конфигурационная координата, характеризующая электрон-фононное взаимодействие,  $W_{opt}$  – оптическая энергия ионизации (прямым переходом),  $W_t$  – термическая энергия ионизации (минимальная энергия, требуемая для освобождения электрона)  $F$  – напряженность электрического поля.



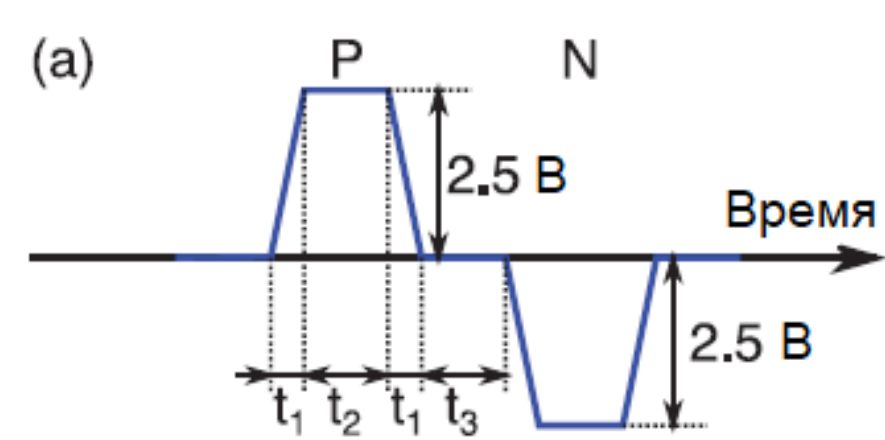
Конфигурационная диаграмма туннелирования электрона между фонон-связанными ловушками.  $U_b(Q)$  – потенциальная энергия ловушки со связанным электроном,  $U_f(Q)$  – потенциальная энергия свободного электрона. Горизонтальная линия отражает туннелирование электрона.

[K.A. Nasyrov and V.A. Gritsenko, *J. Appl. Phys.* 109, 093705 (2011)]

## Эксперимент

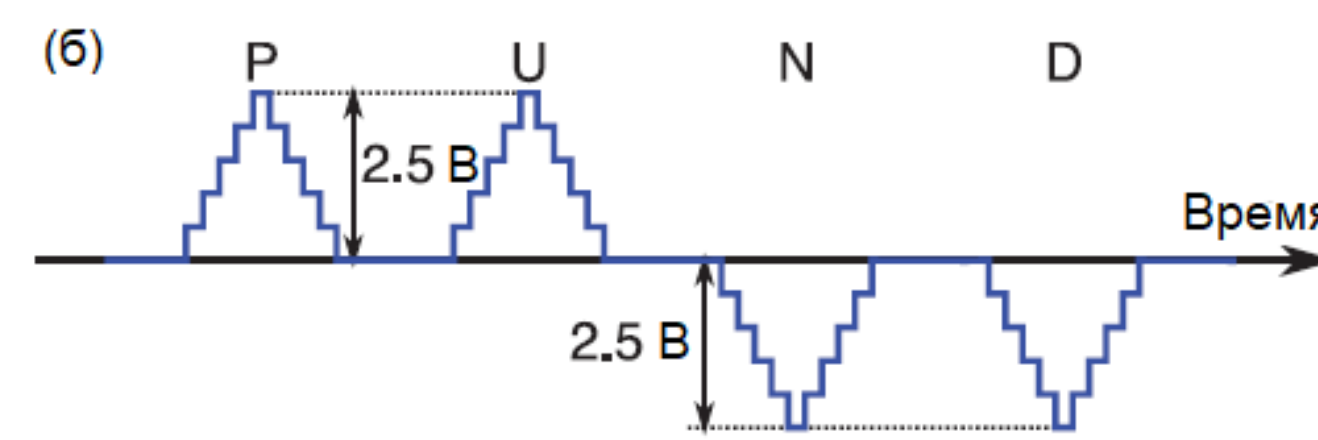
На образец подавалась последовательность импульсов положительного и отрицательного напряжения амплитудой 2.5 В – циклирование (а). Длительность нарастания импульса  $t_1$  составляла 8 нс, время подачи напряжения  $t_2$  и паузы между импульсами  $t_3$  равны и составляли 5 мкс. На некоторых циклах производились измерения PUND (Positive-Up-Negative-Down) методом (б). Данные измерения заключаются в подаче на образец двух положительных и двух отрицательных импульсов напряжения амплитудой 2.5–3.5 В. Было произведено 4000 измерений за полный PUND-цикл за время 21.6 с.

Токи утечки были получены путем усреднения токов, текущих при нарастании и снижении напряжения, подаваемого в импульсе Up или Down:



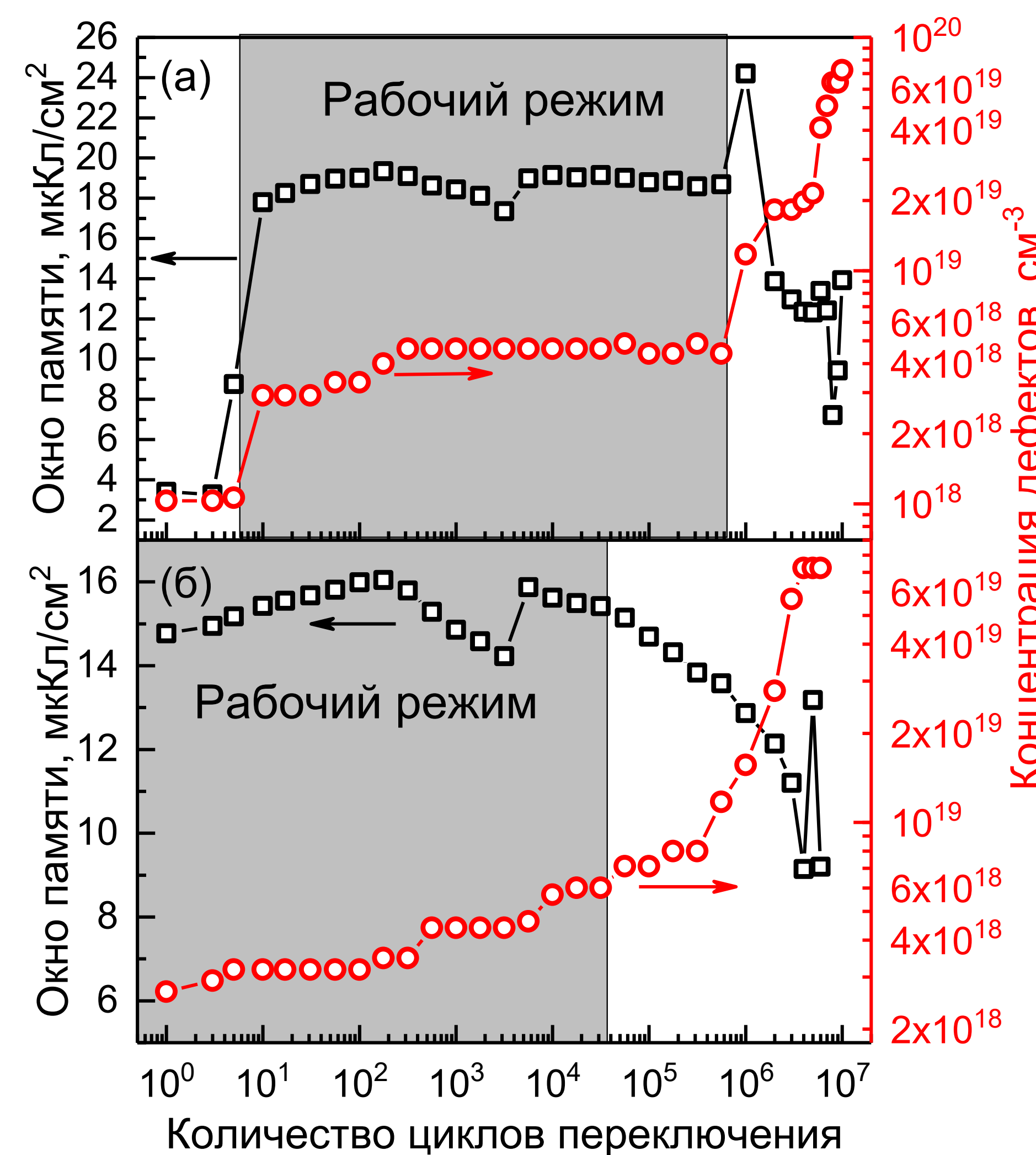
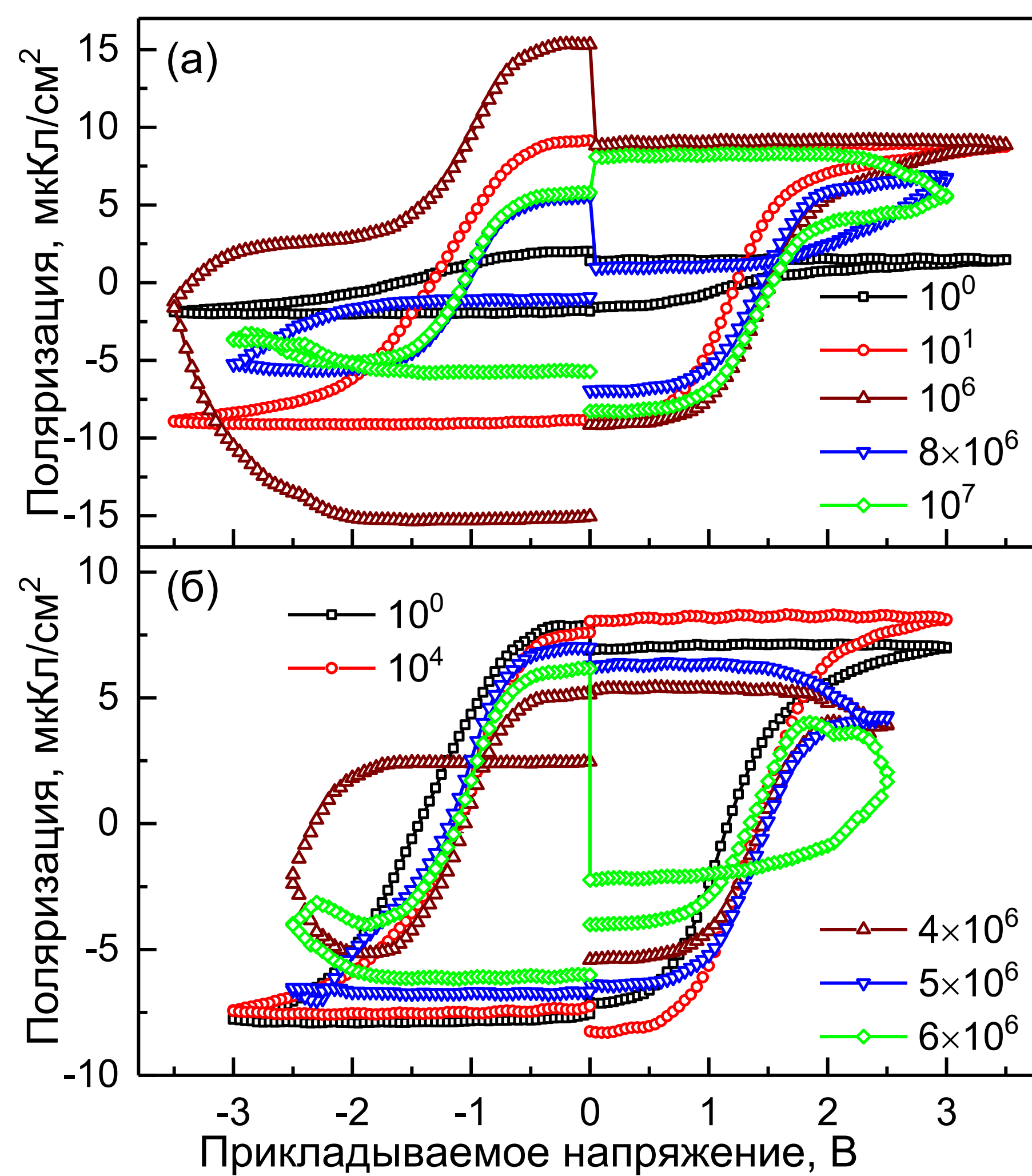
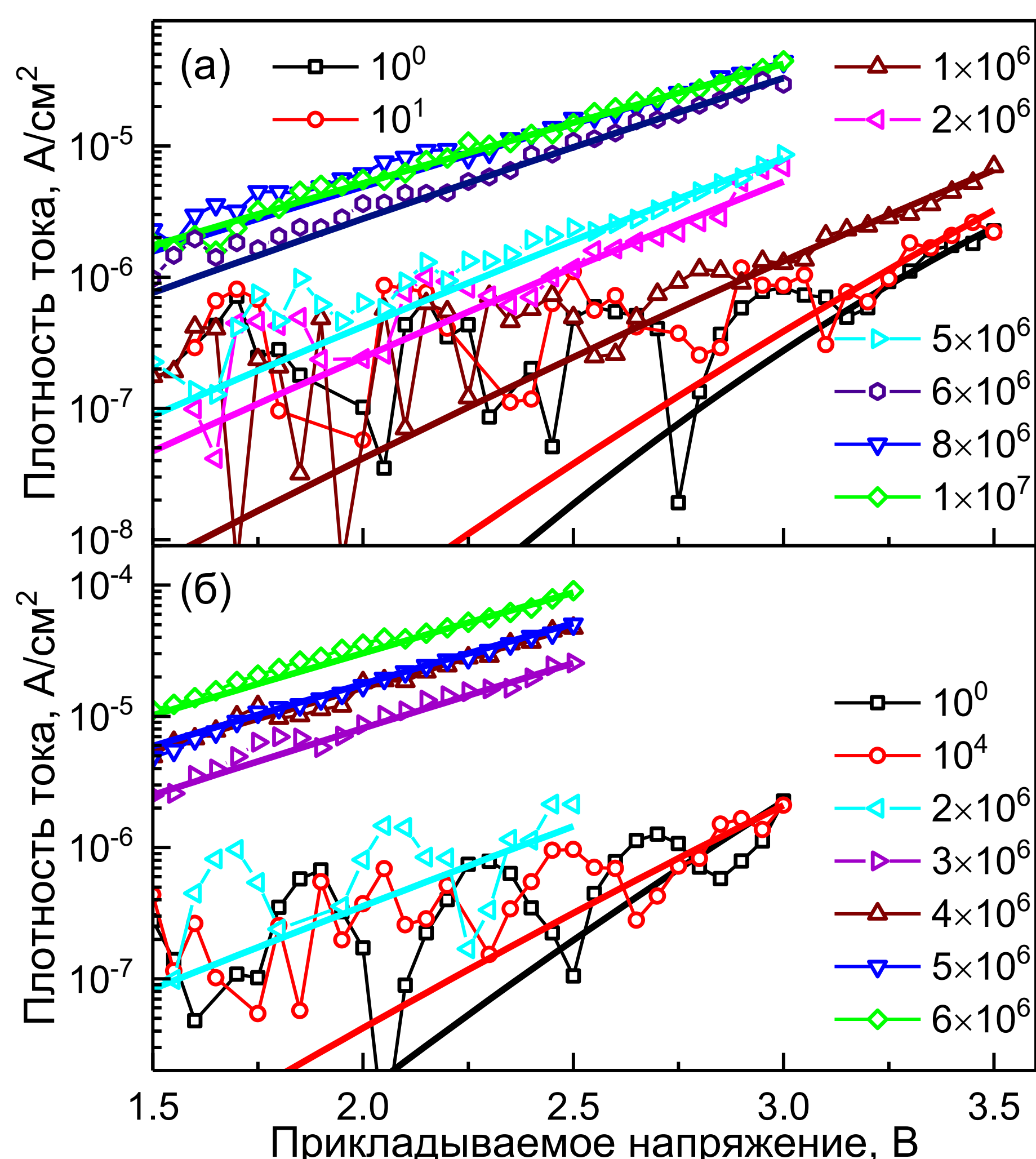
$$I_{leakage}^U(V) = 1/2 (I_{0 \rightarrow +V}^U(V) + I_{+V \rightarrow 0}^U(V)),$$

$$I_{leakage}^D(V) = 1/2 (I_{0 \rightarrow -V}^D(V) + I_{-V \rightarrow 0}^D(V))$$



## Результаты

На рисунках для двух образцов (а, б) представлены слева направо: зависимости плотностей токов утечки от прикладываемого к структуре напряжения; зависимости поляризации от напряжения, прикладываемого к образцу, для разных циклов переключения поля; значения двойной остаточной поляризации в процессе циклирования.



- Показано, что при достижении определенного числа циклов происходит возрастание концентрации дефектов, и вместе с тем уменьшение остаточной поляризации.
- Оптимальные концентрации дефектов для сегнетоэлектрических пленок  $\text{HfO}_2:\text{La}$  лежат в пределах  $(3-6) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №20-57-12003 ННИО\_а.