

Rekombinációs élettartammérési módszerek fejlesztése fotovoltaikus alkalmazásokhoz

Összefoglaló

Krisztián Dávid

Vállalati szakértő: Ferenc Korsós

Semilab Félvezető Fizikai Laboratórium Zrt.

Témavezető: Simon Ferenc

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest, 2025

A napelemek részesedése a globális energiatermelésben évről évre dinamikusan növekszik. 2023-ban a napenergia vált a világon a legnagyobb újonnan telepített kapacitással rendelkező energiaforrássá. Ezen eredmények mögött évtizedes anyagtudományi és félvezető-technológiai kutatás-fejlesztés áll. Az egyátmenetes szilíciumalapú napelemcellák fotoelektromos hatásfokának jelenlegi rekordja 27,3%, amely jelentősen megközelíti a hatásfok közelmúltban pontosított elméleti határértékét. A további fejlesztésekhez ezért a releváns fizikai paraméterek még pontosabb meghatározása szükséges. Jelentős tendencia továbbá, hogy szűkül a kutatólaboratóriumokban elért rekordhatásfokok és a modern gyártósorokon készült napelemek hatásfoka közötti különbség. Így nem csak a hatásfok rekordok érdekében, hanem a gyártási folyamatok megbízható szabályozása érdekében is fejlettebb és pontosabb mérésekre van szükség. A napelemek teljesítményét meghatározó domináns fizikai paraméter a töltéshordozók rekombinációs élettartama. A szilíciumszelet belsejében uralkodó tömbi rekombinációs ráta – amelyet a növesztett kristály minősége, a rácshibák és szennyeződések koncentrációja határoz meg – központi szerepet játszik a napelem hatásfokában. A felületi rekombináció, amely a p-n átmenetnél és az elektromos kontaktusok közelében lép fel, szintén kritikus tényezővé válik a napelemcella gyártása során. A fotoelektromos hatásfok további növelése érdekében számos kutatási projekt elsődleges célja a rekombinációs veszteségek csökkentése.

A szilícium rekombinációs tulajdonságainak megértése és mérése alapvető fontosságú a napelemek teljesítményének javítása szempontjából. A töltéshordozó rekombinációs élettartam pontos meghatározására mérési módszerek széles spektrumát alkalmazzák a kutatás-fejlesztésben és gyártásban egyaránt. A modern gyártási követelmények gyors és érintésmentes technológiák alkalmazását kívánják meg. Ezért a legelterjedtebb mérési megoldások jelenleg optikai gerjesztésen és a töltéshordozó-koncentráció érintésmentes érzékelésén alapulnak. Kutatási munkám a rekombinációs élettartammérési módszerek fejlesztésére és alkalmazásaira fókuszál, elsősorban napelemszerkezetek és a szilícium alapanyag vizsgálatában, mind ipari minőségellenőrzési, mind kutatási célokra. Úgy vélem, hogy az elmúlt négy évben elvégzett munkám hozzájárult a napelemek kutatás-fejlesztési folyamataihoz és az iparág fejlődéséhez. Kutatásaim három, jól szétválasztható fejlesztési területre tagozódnak.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) kutatócsoportjával újszerű, perovszkit struktúrájú fotovoltaikus anyagok rekombinációs tulajdonságait vizsgáltuk egy alacsonyhőmérsékletű mérőrendszer segítségével. A rendszer nemlineáris viselkedésének felismerését követően új, önkonzisztens kalibrációs módszert dolgoztam ki és validáltam ismert szilícium szeleteken. Az alkalmazott kiértékelési rutinok fejlesztésén túl kifejlesztettem egy módszert a mérések megbízhatóságának ellenőrzésére, amely során meghatároztam az alacsony gerjesztettséghez tartozó töltéshordozó mozgékonytságot a teljes vizsgált hőmérsékleti tartományban.

A Semilab Félvezető Fizikai Laboratórium Zrt.-nél (Semilab) végzett munkám lehetővé tette a töltéshordozó-élettartam kísérleti meghatározását a napelemgyártási folyamat különböző szakaszaiban használt szilíciummintákon. Először egy új mérési módszert és egy iteratív, szimulációalapú kiértékelési eljárást dolgoztam ki vastag szilíciumminták tömbi töltéshordozó-élettartamának pontos meghatározására. A kifejlesztett technikával vizsgáltam kiváló minőségű szilíciumrudak tömbi rekombinációs folyamatait, ami más módszerekkel jelenleg nem lehetséges ilyen pontossággal. A módszer időközben beépítésre került a Semilab kereskedelmi forgalomban elérhető élettartammérő készülékébe, ezzel gyors és pontos információt biztosítva az esetleges szennyezők jelenlétéről a gyártás korai fázisában.

Továbbá kifejlesztettem egy egyedi mérési módszert, amely három független töltéshordozó-élettartam mérési elvet egyesít a passzívált szilíciumszeletek vizsgálatához. Ez a módszer lehetővé tette a töltéshordozók koncentrációjának, élettartamának és mozgékonyságának egyidejű, a korábbi érintésmentes módszereknél pontosabb meghatározását modern szilíciumalapú napelemszerkezeteknél. Az elért eredmények alapján egy teljesen új, napelemgyártósókba integrálható rekombinációs élettartammérő készülék fejlesztését koordináltam a Semilabnál.